

Bewertung von Massnahmen zur Beseitigung wesentlicher Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk

Grundlagen für den Vollzug



Andreas Bruder

Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf

September 2012

Das Titelbild zeigt die Einmündung des Gadmerwassers in die Hasliaare bei Innertkirchen. Besonders deutlich ersichtlich sind die unterschiedlichen Eigenschaften der Zuflüsse: ganz hinten die Restwasserstrecke der Hasliaare, in der Mitte das Gadmerwasser mit dem turbinieren Wasser aus der Kraftwerkzentrale Innertkirchen 1 und vorne das turbinierete Wasser aus der Kraftwerkzentrale Innertkirchen 2 der Kraftwerke Oberhasli. Die Fließrichtung ist von links nach rechts.

Danksagung

Das dem Bericht zugrundeliegende Projekt wurde durch ein Projektteam intensiv betreut. Durch die Zusammensetzung des Projektteams war die Expertise und die Sicht der folgenden Akteure im Bereich der Schwall/Sunk-Sanierung vertreten: Der Wissenschaft, der Verwaltung, der Kraftwerksbetreiber und der Ingenieurbüros. Für die Beiträge und Unterstützung der Projektteammitglieder möchte ich mich hiermit herzlich bedanken.

Das Projektteam bestand aus folgenden Mitgliedern:

Alfred Wüest, Eawag, Projektleitung
Stefan Vollenweider, Wasser-Agenda 21, Projektkoordination
Steffen Schweizer, KWO
Armin Peter, Eawag
Martin Huber Gysi, BAFU
Manfred Kummer, BAFU
Irène Schmidli, BAFU
Diego Tonolla, BAFU
Tobias Meile, Basler & Hofmann

In herzlicher Erinnerung an Peter Baumann, der ebenfalls im Projektteam mitgewirkt hat.

Für Diskussionen und Auskünfte möchte ich mich auch herzlich bei folgenden Personen bedanken:

Bruno Polli, Abteilung für Umwelt, Kanton Tessin
Lorenz Jaun, Abteilung für Umwelt, Kanton Uri
Nadia Semadeni, AXPO
Ricardo Mendez, AXPO
Jakob Grünenfelder, Ecowert GmbH
Matthias Schneider, Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH
Johannes Ortlepp, HYDRA
Fernando Binder, fmb-ingenieure GmbH
Werner Dönni, Fischwerk
Martin Pfaundler, BAFU

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Hintergrund	3
1.2 Zielsetzung des Projekts	4
1.3 Vorgehensweise und Inhalt des Berichts	5
2 Projektgrundlagen	7
2.1 Literaturanalyse	7
2.2 Analyse von Fallstudien	7
2.3 Expertenworkshop	8
3 Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie	11
3.1 Allgemeine Bemerkungen	11
3.2 Auswirkungen des Abflussanstiegs	14
3.3 Auswirkungen des hohen Abflusses	17
3.4 Auswirkungen der Abflussabnahme	19
3.5 Auswirkungen des tiefen Abflusses	21
3.6 Hohe Variabilität des Abflusses	22
4 Übersicht über Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen	23
4.1 Allgemeine Bemerkungen	23
4.2 Bauliche Sanierungsmassnahmen	25
4.3 Betriebliche Sanierungsmassnahmen	28
5 Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen	31
5.1 Allgemeine Bemerkungen	31
5.2 Schwallversuche	32
5.3 Physikalische Modelle	32
5.4 Numerische Modelle	32
6 Indikatoren für die Erfassung und Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten	37
6.1 Allgemeine Bemerkungen	37
6.2 Biotische Indikatoren	38
6.3 Abiotische Indikatoren	40

7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	41
7.1	Verwendung von Indikatoren zur Prognostizierung	41
7.2	Prognostizierung basierend auf dem beeinträchtigten Zustand	47
7.3	Bedeutung des lokalen Kontextes	48
7.4	Bedeutung der Morphologie für die Auswirkungen von Schwall/Sunk	49
7.5	Koordination mit anderen Revitalisierungsbestrebungen	49
7.6	Die Bedeutung von Erfolgskontrollen	50
7.7	Die Bedeutung von partizipativen Verfahren	51
7.8	Anwendung der Indikatoren in nicht watbaren Gewässern	52
7.9	Vorschläge für Forschungsprojekte	52
8	Literaturverzeichnis	57
9	Anhang	65
9.1	Expertenworkshop	65
9.2	Beschreibung der Fallstudien	69

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Auswirkungen von Schwall/Sunk durch Speicherkraftwerke auf die Fliessgewässer, Möglichkeiten zur Sanierung sowie Ansätze zur Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen. Er präsentiert den aktuellen Kenntnisstand in diesen Bereichen als Grundlage für die Erarbeitung einer Vollzugshilfe des BAFU für die zweite Phase der Sanierungsplanung im Bereich Schwall/Sunk.

Speicherkraftwerke leisten einen wichtigen Beitrag zur Stromproduktion und Netzstabilität in der Schweiz der in den kommenden Jahrzehnten noch zunehmen dürfte. Durch ihre intermittierende Produktion leiten sie turbiniertes Wasser in der Regel über kurze Zeiträume in die Flüsse, während in der restlichen Zeit nur die Restwassermenge im Fluss vorhanden ist. Der resultierende Schwall/Sunk verursacht eine starke Beeinträchtigung der Lebewesen (Fische, Makroinvertebraten, Pflanzen, etc.) in der betroffenen Flussstrecke. Diese Beeinträchtigung entstehen durch die unnatürlichen Abflussbedingungen, hauptsächlich durch die extrem schnellen Abflussänderungen und die Häufigkeit der Abflussextrême, an welche die Lebewesen nicht angepasst sind.

Das revidierte Gewässerschutzgesetz schreibt eine Reduktion dieser Beeinträchtigungen primär mit baulichen Massnahmen vor. Auf Antrag der Kraftwerkbetreiber können auch betriebliche Massnahmen, d. h. durch Anpassung der Produktion, in Betracht gezogen werden. Für die Auswahl und Planung der Massnahmen ist eine Prognostizierung ihrer Wirkung auf das Ökosystem notwendig. Hierfür eignen sich – wie auch für die Beurteilung der Beeinträchtigung – Indikatoren, welche die Eigenschaften und den Zustand des Flussökosystems unter Einbezug der Auswirkungen der Sanierungsmassnahme beschreiben.

Der Bericht basiert auf der Auswertung unterschiedlicher Quellen: der Literatur, Fallstudien und Expertenwissen. In einem internationalen Expertenworkshop wurden die Indikatoren im Bezug auf ihre Verwendung zur Prognostizierung bewertet und weiterentwickelt. Darauf aufbauend wird ein Indikatorenset zur Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die Gewässerökologie vorgeschlagen.

Ein weiteres Resultat der Auswertungen sind Empfehlungen zur Planung und Umsetzung von Massnahmen und Vorschläge für Forschungsprojekte, welche die Anwendung des vorgeschlagenen Indikatorensets oder die Prognostizierung im Allgemeinen unterstützen würden. Es hat sich gezeigt, dass konkrete Erfahrungen sehr rar sind, weil erst wenige Sanierungsmassnahmen umgesetzt wurden und ihre Auswirkungen beurteilt werden konnten. Eine Konsequenz aus dieser Erkenntnis ist, dass laufende Sanierungsprojekte ausführlich ausgewertet und wenn möglich von Forschungsprojekten begleitet werden sollten.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Die Bedeutung von Speicherkraftwerken und ihre Auswirkungen

Speicherkraftwerke leisten einen elementaren Beitrag zur Stromproduktion und Versorgungssicherheit durch ihren grossen Anteil an der Schweizerischen Stromproduktion. Aufgrund ihrer Flexibilität können sie ausserdem schneller als die anderen wichtigen Stromproduzenten die Leistung erhöhen oder verringern, was neben der kontinuierlichen Verfügbarkeit von Strom auch für die Netzstabilität notwendig ist. Pumpspeicherkraftwerke haben zusätzlich die Möglichkeit, Energie, welche zu Zeiten mit niedrigem Verbrauch anfällt, zwischenspeichern, in dem sie verwendet wird, um Wasser in die Speicherseen zu pumpen. Zusammengenommen erzeugten die (Pump-)Speicherkraftwerke im Jahre 2010 ein Drittel (oder 21.4 TWh) der Schweizerischen Stromproduktion (BFE 2011).

Die Bedeutung von (Pump-)Speicherkraftwerken hat in den letzten Jahrzehnten zugenommen und dürfte noch weiter zunehmen. Diese Zunahme basiert auf den Bestrebungen, die Stromlücke zu schliessen, welche durch den Atomausstieg entstehen wird und die zunehmende Strommenge aus neuen erneuerbaren Quellen (Wind- und Solarenergie) zwischenspeichern, da deren Produktion nicht an die Nachfrage gekoppelt ist. Diese Veränderungen im Energiesystem haben in den letzten Jahren den Bau von neuen Pumpspeicherkraftwerken oder von Erweiterungen bestehender Anlagen begünstigt. Zur Zeit sind Projekte im Bau oder in der Planung, welche die totale installierte Leistung von (Pump-)speicherkraftwerken in der Schweiz in den nächsten Jahren um einen Faktor 3.5 vergrössern dürften (Wüest et al. 2012). Die grössten Projekte sind die Erweiterung der Kraftwerke Linth-Limmern, Lagobianco und Nant de Drance mit jeweils knapp 1 GW zusätzlicher Leistung (s. Kapitel 9.2).

Neben den oben genannten Vorteilen verursachen (Pump-)Speicherwerken jedoch auch beträchtliche Schäden an den Ökosystemen des genutzten Flusssystems, primär aufgrund der extremen Abflussschwankungen durch die Einleitung des turbinieren Wassers über einen kurzen Zeitraum und der Speicherung des Niederschlags in Zeiten ohne Turbinierung (Schwall/Sunk- und Restwasserproblematik, s. Kapitel 3 für eine Übersicht der negativen Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie).

1.1.2 Sanierung der Wasserkraftnutzung

Ein wichtiges Ziel des revidierten Gewässerschutzgesetzes und der revidierten Gewässerschutzverordnung, die seit Anfangs 2011, respektive Anfangs Juni 2011 in Kraft sind, ist die

Reduktion der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf die Flussökosysteme. Die gesetzlichen Änderungen sind eine Folge der Parlamentbeschlüsse aus dem Jahre 2009 zur Renaturierung der Gewässer als Reaktion auf die Initiative „Lebendiges Wasser“ der Fischereiverbände von 2006. Die Sanierung von Schwall/Sunk wird in diesen gesetzlichen Vorgaben explizit geregelt (Art. 39a GSchG und Art. 41e GSchV). Die Sanierung der Fischwanderung, des natürlichen Geschiebehauhalts und der allgemeinen Gewässermorphologie sind weitere Schwerpunkte, die zur Zeit im Rahmen dieser Sanierungsbestrebungen angegangen werden.

Das Bundesamts für Umwelt (BAFU) schätzt das Ausmass der potentiellen Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk (Verhältnis zwischen maximalem und minimalem Abfluss grösser oder gleich 1.5) in der Schweiz auf über 1000 km Gewässerlänge durch mehr als 130 Kraftwerke. Da die voralpinen Seen die Abflussschwankungen durch Schwall/Sunk weitgehend dämpfen, sind primär die alpinen Flüsse betroffen. Das revidierte Gewässerschutzgesetz und die entsprechende Verordnung schreiben die Sanierung von Kraftwerken vor, die Schwall/Sunk mit erheblichen Auswirkungen auf die Gewässerökologie verursachen. Gemäss der Schweizerischen Gesetzgebung liegen erhebliche Auswirkungen vor, wenn das Schwall/Sunk-Verhältnis grösser oder gleich 1.5 ist und die standortgerechte Lebensgemeinschaft (Menge, Zusammensetzung und Vielfalt der Pflanzen und Tiere) nachteilig verändert wird (Art. 41e GSchV).

Die Sanierungen sollen mit baulichen Massnahmen erfolgen, so dass die Stromproduktion und die Regulierfunktion der Kraftwerke nicht eingeschränkt wird (Baumann et al. 2012, s. auch Kapitel 4). Zur Finanzierung der genehmigten Sanierungen im Verursacherprinzip wird ein Aufpreis der Netzübertragungskosten von 0.1 Rp./kWh erhoben (Art. 15b EnG), was zu einem Fonds im Umfang von etwa 1 Mrd. Franken bis ins Jahre 2030 führen sollte, der für die Sanierung der Wasserkraftnutzung zur Verfügung steht. Bis dann müssen die Kraftwerksbetreiber die Sanierungsmassnahmen erfolgreich umgesetzt haben, um ihre Kosten aus diesem Fonds zu decken. Diese Regelung bezieht sich nur auf bestehende Konzessionen und Neukonzessionen von Kraftwerken ohne Ausbau. Für die Entschädigung von Kraftwerken mit einem gleichzeitigen Ausbau sind nur die Bedingungen vor dem Ausbau relevant. Für neue Kraftwerke ist keine Entschädigung vorgesehen, da sie schon bei Inbetriebnahme den aktuellen gesetzlichen Vorgaben entsprechen müssen.

Die Planung der Sanierungen wird in Zusammenarbeit zwischen Kantonen und Kraftwerksbetreibern durchgeführt und vom BAFU koordiniert und geprüft. In der ersten Planungsphase (bis Ende 2014) identifizieren die Kantone die schwallbeeinflussten Gewässer sowie die schwallverursachenden Kraftwerke und bestimmen die Art der Sanierungsmassnahmen. In der zweiten Planungsphase (ab 2015) prüfen die Kraftwerksbetreiber die vorgeschlagenen Sanierungsmassnahmen, vertiefen die Planungsarbeiten und setzen die Sanierungsmassnahmen um, nachdem sie von Kanton und BAFU genehmigt wurden. Für diese Planungsphase ist eine Bewertung der verschiedenen Sanierungsvarianten notwendig, welche auch auf einer Wirkungsabschätzung nach ökologischen Gesichtspunkten basiert.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Dieser Bericht richtet sich an das Bundesamt für Umwelt, als Hilfe zur Ausgestaltung einheitlicher Vorgaben für die zweite Phase der Sanierungsplanung, also bei der Beurteilung und Planung von Sanierungsmassnahmen. Die Planung von Sanierungsmassnahmen beruht auf einer Abschätzung ihrer Auswirkungen auf die Dämpfung von Schwall/Sunk und der dadurch erzielten Reduktion der Beeinträchtigung für die Gewässerökologie. Um die

Auswirkungen von Schwall/Sunk abschätzen zu können, muss sich der Zustand der Gewässerökologie unter Berücksichtigung der erwarteten Veränderungen des Abflussregimes durch die Sanierungsmassnahmen prognostizieren lassen.

Obwohl Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen für mehrere Kraftwerke in der Schweiz geplant oder umgesetzt wurden, fehlt eine fundierte Diskussion und Ausarbeitung der möglichen Vorgehensweisen zur Wirkungsabschätzung von Sanierungsmassnahmen. Das Ziel dieses Projekts war die Auswertung der gemachten Erfahrungen aus diesen Sanierungsprojekten und die Weiterentwicklung der Vorgehensweise anhand von Diskussionen mit Experten und der Auswertung der Literatur. Daraus wurden Empfehlungen für die Planung und Umsetzung von Sanierungsmassnahmen erarbeitet.

1.3 Vorgehensweise und Inhalt des Berichts

Die Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie und der Bewertung und Planung von Sanierungsmassnahmen stammen aus der Analyse der Fachliteratur, aus Fallstudien, aus der Diskussion mit Experten sowie aus einem internationalen Expertenworkshop. Die möglichen Auswirkungen von Schwall/Sunk wurden erfasst und beschrieben, um ihre gegenseitige Beeinflussung und ihre Prognostizierbarkeit abschätzen zu können (Abb. 3.3).

Die aktuellen Sanierungsprojekte wurden fundiert ausgewertet und Erkenntnisse daraus abgeleitet. Dies ermöglichte ein Wissensgewinn unter Bedingungen, wie sie für die meisten anfallenden Sanierungsprojekte realistisch sind (z. B. gesellschaftliche Rahmenbedingungen, involvierte Experten, etc.). Erschwerend für die Übertragbarkeit der Resultate auf zukünftige Sanierungsprojekte dürfte sich die Tatsache auswirken, dass sich der gesetzliche Rahmen verändert hat. Ausserdem ist nun eine Vollzugshilfe für die erste Planungsphase verfügbar, was sich auf die Gestaltung der gewässerökologischen Untersuchungen auswirken und zu Unterschieden zwischen den ausgewerteten Fallstudien und den zukünftigen Sanierungsprojekten führen dürfte.

Die möglichen Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie können mit geeigneten Indikatoren erfasst und beschrieben werden. Für die Prognostizierung der Auswirkungen der Sanierung auf Schwall/Sunk-Effekte wurden diese Indikatoren mit Hilfe einer Literaturanalyse, Diskussionen mit Experten und der Auswertung von Erfahrungen aus den Fallstudien im Bezug auf ihre Sensibilität auf Schwall/Sunk und auf ihre Prognostizierbarkeit beurteilt. Basierend auf dieser Beurteilung wurde ein Indikatorenset zur Prognostizierung vorgeschlagen. Durch die Auswertung von Fallstudien konnten ausserdem konkrete Erfahrungen aus der Planung oder der Umsetzung von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen ausgewertet und Erkenntnisse zur Unterstützung künftiger Sanierungsplanungen gewonnen werden.

Kapitel 2

Projektgrundlagen

Die Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk, der Sanierungsmassnahmen und der Möglichkeiten diese für die Sanierungsplanung zu prognostizieren basiert auf einer Auswertung verschiedenster Quellen. Mit einer Literaturanalyse und den Erfahrungsberichten aus verschiedenen Fallstudien konnten der Grundlagen in diesen Bereichen erarbeitet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden dann in Diskussionen und während einem Expertenworkshop weiterentwickelt, mit dem Ziel, die Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen zu unterstützen. Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise und die verwendeten Quellen.

2.1 Literaturanalyse

In einer Literaturstudie haben Baumann & Klaus (2003) die damals zugänglichen Forschungsberichte ausgewertet. Seit erscheinen ihres Berichts hat die Anzahl publizierter Forschungsarbeiten und Projektberichte jedoch nochmals deutlich zugenommen. Die Analyse von wissenschaftlichen Publikationen und Projektberichten (sogenannte „Graue Literatur“) im Rahmen dieses Projekts bot die Grundlage für die Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk, der Sanierungsmassnahmen und deren Planungsmöglichkeiten. Daneben ermöglichte sie eine detaillierte Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk, welche die Erkenntnisse aus unterschiedlichsten Flusssystemen integriert (s. Kapitel 3).

2.2 Analyse von Fallstudien

Die untersuchten Fallstudien umfassten bewusst Projekte mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Sie reichen von den grossen Ausbauprojekten der Kraftwerke Oberhasli, Linth-Limmern und Lagobianco und den Revitalisierungsprojekten längerer Flieisstrecken des Alpenrheins und des Ticino, die den Einfluss vieler Kraftwerke aufweisen, bis zu mittleren (Kraftwerk Amsteg) und kleinen Projekten (Revitalisierung des Ijentalerbachs) in der Schweiz. Durch diese Auswahl wurde eine möglichst breite Abdeckung der zu erwartenden Eigenschaften der Projekte angestrebt. Als Folge dieser Auswahl unterschieden sich die Projekte bezüglich der Komplexität der Kraftwerkinstallationen, der Motivation der Sanierungen, der Sanierungsmöglichkeiten aber auch der Grösse und Vielfältigkeit der Flusssysteme.

Mit Hilfe der an den Projekten beteiligten Experten und den Projektberichten wurden die zugrundeliegenden Informationen über die Fallstudien erarbeitet. Dies erlaubte

eine Auswertung der Vorgehensweise der Sanierungsplanung im jeweiligen Fall sowie der wichtigsten Resultate der verschiedenen Planungsschritte. Der Einbezug der beteiligten Experten ermöglichte es, auch Informationen auszuwerten, welche nicht in den Berichten beschrieben wurden. Oftmals sind solche Informationen jedoch wichtig für den Erfahrungsgewinn aus solchen Projekten und zur Unterstützung zukünftiger Projekte (z. B. aus kritischen Diskussionen der Vorgehensweise, der partizipativen Rahmenbedingungen etc.). Die daraus entwickelten Empfehlungen werden in Kapitel 7 beschrieben. In einigen Fallbeispielen existieren Einschränkungen in der Verfügbarkeit der Informationen, da sich die notwendigen Daten entweder noch in Bearbeitung befanden oder nur teilweise zur Verfügung gestellt werden konnten. Die ausgewerteten Fallstudien sind in Tabelle 2.1 beschrieben, ausführlichere Informationen finden sich in Kapitel 9.2.

Da die Planungen der berücksichtigten Kraftwerke und Erweiterungsprojekte vor Inkrafttreten des revidierten Gewässerschutzgesetzes angegangen wurde, basiert die Vorgehensweise nicht direkt den Empfehlungen des BAFU (Baumann et al. 2012). Da jedoch oft die gleichen Experten in die Untersuchungen der verschiedenen Bewilligungsverfahren und die Erarbeitung der Vollzugshilfe des BAFU involviert waren, ist dennoch mit einer grossen Ähnlichkeit der Vorgehensweise zu rechnen.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die ausgewerteten Fallstudien. Darin aufgeführt sind die während der Ist-Analyse (Defizitanalyse) des beeinträchtigten Zustandes erhobenen Indikatoren, die Zielwerte der Sanierungen, die in Betracht gezogenen Sanierungsmassnahmen, die Beschreibung der verwendeten Prognostizierungsansätze sowie der Stand der Sanierung.

2.3 Expertenworkshop

Eine effiziente Möglichkeit zur Erfassung von Expertenwissen und für weiterführende Diskussionen bot ein internationaler Workshop, den das Projektteam organisierte und am 20. Juni 2012 an der Eawag durchführte (s. Kapitel 9.1). Die anwesenden Experten mit unterschiedlichem fachlichen Hintergrund (Ökologen, Hydrauliker, Modellierer etc.) vereinten Erfahrungen aus den meisten Ländern, in denen die Schwall/Sunk-Problematik relevant ist und in denen dessen Sanierung zur Zeit angestrebt wird (d. h. aus der Schweiz, Österreich, Frankreich, Italien, Deutschland, Norwegen, Polen und den USA; s. Teilnehmerliste in Kapitel 9.1). Der Fokus des Workshops war primär auf der Erarbeitung eines Indikatorensets zur Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen.

Ein weiteres Ziel des Workshops war der allgemeine Austausch zwischen den Experten und die Identifikation von Kenntnislücken in der Prognostizierung von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen. Daraus konnten im Anschluss an den Workshop Forschungsvorschläge erarbeitet werden (s. Kapitel 7.9). Dabei bot er auch ausgezeichnete Gelegenheiten zum Austausch von grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen. Praxiserfahrungen aus der Umsetzung von Sanierungsmassnahmen wurden während dem Workshop nicht gezielt angesprochen, sie waren aber Hauptbestandteil des vorangehenden Symposiums der Alpenkonvention zum Thema Schwall/Sunk, an dem die meisten der Experten ebenfalls teilnahmen.

Tabelle 2.1: Beschreibung der Fallstudien und ihrer Vorgehensweise zur Schwall/Sunk-Sanierung. Farben geben den Zustand des jeweiligen Indikators wieder: rot = stark beeinträchtigt, orange = leicht beeinträchtigt, grün = nicht beeinträchtigt, schwarz = Resultate unbekannt. MZB = Makrozoobenthos

	Kraftwerke Oberhasli	Kraftwerke Lintih-Limmern	Kraftwerk Lagbianco	Kraftwerk Amsteg
Defizitanalyse ^{a)}	Morphologie, Drift, Kolmation, Fischbiomasse und -abundanz, Fischdiversität, Fischreproduktion, MZB-Biomasse und -abundanz, MZB-Diversität, Algenbewuchs	Morphologie, Drift, Stranden, Substratbewegung, Schwebstoffe, Temperatur, Fischverlärchung und -laichareale, MZB-Biomasse, Algenbewuchs	(Berichte noch nicht zugänglich)	Morphologie, Drift, Stranden, Temperatur, Fischbiomasse, Fischdiversität, MZB-Biomasse und -Abundanz, MZB-Diversität, Algenabundanz
Hydrologische Zielwerte	Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten	Maximaler Abfluss, Abflussänderungsraten	Maximaler Abfluss, Abflussänderungsraten	Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten
Ökologische Zielwerte	Höhere Biomasse und Diversität des MZB, bessere Reproduktion der Fische	Bessere Reproduktion der Bachforelle	Allgemein bessere Bedingungen für die Gewässerökologie	Bessere Bedingungen von Fischen, MZB und Algen bez. Arten und Biomasse
Limitierend für das Erreichen der ökologischen Zielwerte	Vernetzung, Drift, verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	Drift, morphologische Vielfalt	Drift, morphologische Vielfalt
Vorgesehene Sanierungsmassnahmen	Beruhigungsbecken (stollen), morphologische Aufwertungen	Beruhigungsbecken, betriebliche Massnahmen, morphologische Aufwertungen	Direkte Ableitung in einen See, morphologische Aufwertungen	Ausgleichsstollen, morphologische Aufwertungen
Weitere diskutierte Massnahmen	Ableitung in einen See	Ableitung in einen grösseren Fluss	keine	keine
Prognostizierungsansätze	Schwallversuche, zweidimensionale numerische Modelle, physikalische Modelle	Schwallversuche, eindimensionale numerische Modelle	Eindimensionale numerische Modelle für die Seen	Schwallversuche, eindimensionale numerische Modelle
Prognostizierte Indikatoren	Abfluss, Drift, Substratbewegungen, Habitatverfügbarkeit	Abfluss, Drift, Substratbewegungen, Laichareale, Geschlebetransport, Strömungsverhältnisse, Trübung, Morphologie	Temperatur, Partikelkonzentration, Strömungen und Diffusion in den Seen	Abfluss, Drift, Stranden
Stand der Sanierungsprojekte	Planung im Genehmigungsverfahren	Bau abgeschlossen, Betrieb noch nicht vollständig umgestellt	Planung im Genehmigungsverfahren	Bau abgeschlossen, Betrieb noch nicht vollständig umgestellt

^{a)}: Siehe auch Kapitel 6 für eine Beschreibung der Indikatoren der Defizitanalyse

Tabelle 2.1: fortgesetzt

	Kraftwerk am Ijentalerbach	Revitalisierung des Alpenrheins	Revitalisierung des Ticinos
Defizitanalyse ^(*)	Morphologie, Kolmation, Laichareale	Morphologie, Stranden, Kolmation, Substratbewegung, Trübung Laichareale, MZB-Biomasse und -abundanz, MZB-Diversität, Algenbewuchs	Morphologie, Drift, Stranden, Kolmation, Temperatur, Laichareale, Fischreproduktion, Fischdiversität, MZB-Diversität
Hydrologische Zielwerte	Minimaler Abfluss	Maximaler Abflussänderungsraten	Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten
Ökologische Zielwerte	Repräsentative Fischpopulationen	Repräsentative Fischpopulationen	Noch nicht bestimmt (besserer allgemeiner ökologischer Zustand)
Limitierend für Erreichen der ökologischen Zielwerte	Habitatverfügbarkeit, minimaler Abfluss	Verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	Drift, Stranden, morphologische Vielfalt, verfügbare Laichfläche
Vorgesehene Sanierungsmassnahmen	Betriebliche Massnahmen	noch keine	noch keine
Weitere diskutierte Massnahmen	keine	Ausgleichsbecken, Aufwertungen	Ausgleichsbecken, morphologische Aufwertungen, betriebliche Massnahmen
Prognostizierungsansätze	Zweidimensionale numerische Modelle	Zweidimensionale numerische Modelle	Eindimensionale numerische Modelle
Prognostizierte Indikatoren	Abfluss, Habitatverfügbarkeit	Abfluss, Habitatverfügbarkeit	Abfluss
Stand der Sanierungsprojekte	Umgesetzt	Defizitanalyse durchgeführt	Defizitanalyse durchgeführt, Massnahmen vorgeschlagen

^(*): Siehe auch Kapitel 6 für eine Beschreibung der Indikatoren der Defizitanalyse

Kapitel 3

Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie

Die kurzfristigen Änderungen der Stromproduktion von Speicherkraftwerken führen zu starken Schwankungen in der Menge des turbinieren und in die Schwallstrecke eingeleiteten Wassers innerhalb kurzer Zeit. Dies verursacht unnatürliche Abflussbedingungen in der Schwallstrecke, die sich negativ auf die Gewässerökologie auswirken. Dieses Kapitel beschreibt die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse, den Fallstudien und den Diskussionen mit Experten über die Auswirkungen von Schwall/Sunk. Die Erkenntnisse basieren auf vielfältigen Quellen, welche ein umfassendes und aktuelles Bild dieser Kenntnisse bieten. Für die systematische Einteilung der Effekte wurde auf die hydrologischen Eigenschaften von Schwall/Sunk zurückgegriffen, weil sich diese nachvollziehbar in verschiedene Phasen mit deutlich unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen unterteilen lassen (der Abflussanstieg, der hohe Abfluss, die Abflussabnahme, der tiefe Abfluss und die hohe Variabilität des Abflusses; Tab. 3.1). Detaillierte Kenntnis über die Effekte von Schwall/Sunk und das Wirkungsgefüge ist auch eine Grundlage für die Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen. Sie zeigt auf, welche Einflussgrößen für Effekte und Prozesse relevant sind und für ihre Prognostizierung berücksichtigt werden müssen.

3.1 Allgemeine Bemerkungen

Durch den Betrieb von Speicherkraftwerken kommt es zu extremen Abflussschwankungen in der Schwallstrecke mit oftmals mehreren Schwall/Sunk-Ereignissen pro Tag (Abb. 3.1). Die hohen Abflussphasen während einem Schwalldurchgang werden von Phasen mit niedrigem Abfluss unterbrochen, welche im Winter oft nicht mehr als die gesetzlich vorgeschriebene Restwassermenge aufweisen. Eine Folge der hohen Flexibilität der Stromproduktion von Speicherkraftwerken sind die extremen Abflussänderungsraten, während denen die Produktion über einen sehr kurzen Zeitraum hoch- oder zurückgefahren wird.

Schwallereignisse sind während Perioden mit hoher Energienachfrage (über die Mittagszeit und am frühen Abend von Arbeitstagen) am ausgeprägtesten, an Wochenenden und in den Weihnachtsferien fallen sie hingegen geringer aus (Abb. 3.1). Hydrologisch können Schwallereignisse daher durch folgende Parameter beschrieben werden: der minimale und maximale Abfluss (Q_{min} und Q_{max}), das Schwall/Sunk-Verhältnis (Q_{max}/Q_{min}), die Schwall/Sunk-Amplitude ($Q_{max} - Q_{min}$), und die Abfluss- und Pegeländerungsraten ($\Delta Q_{Schwall}$, ΔQ_{Sunk} , resp. $\Delta cm/s_{Schwall}$, $\Delta cm/s_{Sunk}$), sowie die Häufigkeit von Schwal-

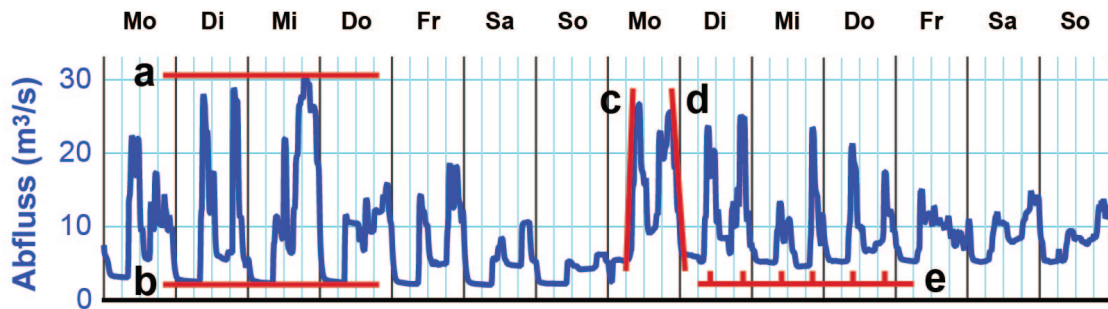


Abbildung 3.1: Schwallbeeinflusste Abflussganglinie am Beispiel der Vispa bei Visp während zwei Wochen anfangs März 2012. Rot hervorgehoben sind die Parameter zur hydrologischen Beschreibung der Schwallereignisse: a: Q_{max} , b: Q_{min} , c: $\Delta Q_{Schwall}$, d: $\Delta cm/s_{Sunk}$, e: Häufigkeit der Schwallereignisse (verändert nach BAFU Hydrologie 2012).

ereignissen (Abb. 3.1; Meile et al. 2005).

Die durch den Kraftwerksbetrieb veränderten hydrologischen Bedingungen wirken sich auf die Hydraulik in der Schwallstrecke aus. So werden die Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten, Korngrößen, etc., sowie die zeitliche und räumliche Verteilung dieser Eigenschaften durch den Abfluss und dessen Dynamik aber auch der Morphologie der Schwallstrecke bestimmt. Das Zusammenwirken der Hydrologie, des Sedimentregimes, der Hydraulik und der Morphologie bestimmt die physikalischen Lebensbedingungen (Habitate) für die Gewässerorganismen und somit deren Möglichkeiten die Schwallstrecke dauerhaft zu besiedeln (Abb. 3.2).

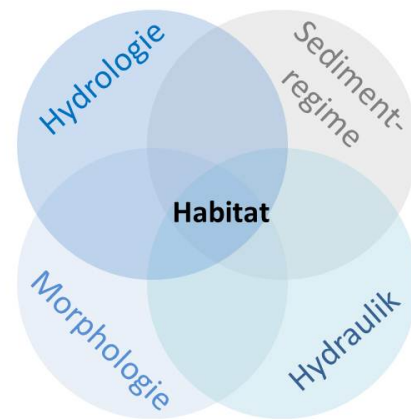


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der interagierenden Auswirkungen der Hydrologie, des Sedimentregimes, der Hydraulik und der Morphologie der Schwallstrecke auf die physikalischen Habitateigenschaften.

Durch Schwall/Sunk werden über die Hydrologie, die Hydraulik und die Morphologie Prozesse ausgelöst, welche die Habitateigenschaften der Gewässerorganismen zu deren Ungunsten verändern und sich so indirekt auf die Artenzusammensetzung, die Abundanz und die Biomasse auswirken (Moog 1993, Céréghino & Lavandier 1998, Jackson et al. 2007, Schweizer et al. 2009). Zusätzlich werden biologische

Prozesse gestört (z. B. Fortpflanzung, Migration, trophische Interaktionen), welche die Lebensgemeinschaften ebenfalls beeinträchtigen (Abb. 3.3, Tab. 3.1; Fischnetz 2004).

Durch diese Vernetzung der abiotischen und biotischen Eigenschaften von Ökosystemen entsteht ein komplexes Wirkungsgefüge (Abb. 3.3). Dadurch können Flussökosysteme und die Auswirkungen von Schwall/Sunk nicht durch die Beschreibung von einigen wenigen Indikatoren vollständig erfasst werden (s. Kapitel 6).

Verschiedene Arten und Organismengruppen reagieren aufgrund ihres Körperbaus und spezifischen Verhaltensmustern und -möglichkeiten unterschiedlich stark auf Schwall/Sunk. Dadurch wird auch oft die Zusammensetzung der Tier- und Pflanzengemeinschaft in der Schwallstrecke verändert (Céréghino & Lavandier 1998, Fischnetz 2004). Ausserdem beeinflussen sich Organismengruppen gegenseitig, zum Beispiel, wenn sie im Nahrungsnetz

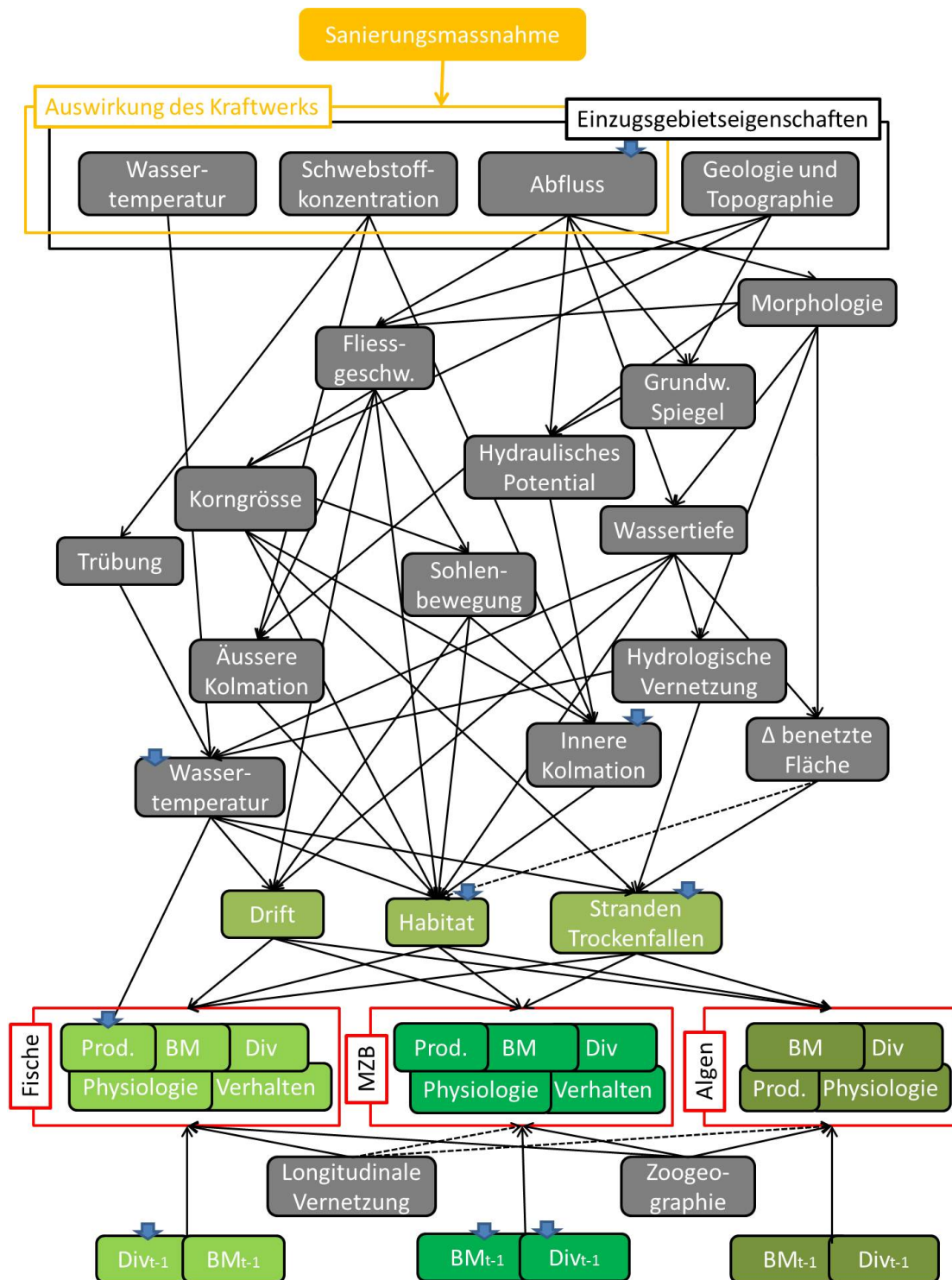


Abbildung 3.3: Interaktionen zwischen abiotischen (grau dargestellt) und biotischen (grün) Ökosystemeigenschaften, welche durch Schwall/Sunk beeinflusst werden (die Pfeile entsprechen der Richtung der Beeinflussung). Die direkten Auswirkungen der Kraftwerke und der Sanierungsmassnahmen wurden orange hervorgehoben. Die blauen Pfeile markieren Indikatoren die in der Vollzugshilfe (zumindest tw.) berücksichtigt sind (Baumann et al. 2012). Prod. = Produktivität, MZB = Makrozoobenthos, Div = Diversität, BM = Biomasse, Div_{t-1} und BM_{t-1} = Div und BM zu einem früheren Zeitpunkt, z. B. vor der Sanierung.

des Gewässers miteinander verbunden sind (z. B. ist das Makrozoobenthos die wichtigste Nahrungsressource für viele Fischarten und die meisten Arten des Makrozoobenthos benötigen Aufwuchsalgen und -biofilm als Nahrung oder als Lebensraum). Somit kann sich die Schädigung oder Begünstigung einer bestimmten Organismengruppe auch auf andere Gruppen auswirken (Moog 1993, Young et al. 2011).

Die Komplexität der Ökosysteme und der Auswirkungen von Schwall/Sunk legen nahe, dass für eine möglichst vollständige Untersuchung der gewässerökologischen Defizite die verschiedenen Organismengruppen gesondert berücksichtigt werden müssen (d. h. Untersuchungen über den Zustand von Fischen, Makrozoobenthos, Algen, Makrophyten und terrestrischen Organismengruppen; Baumann et al. 2012). Auch sollten Informationen über die Sensibilität einzelner Arten und unterschiedlicher Lebensstadien erfasst werden (Cocherell et al. 2011, Young et al. 2011). Die unterschiedliche Sensibilität verschiedener Lebensstadien kann anhand der Fische beispielhaft erläutert werden. Juvenile Fische sind besonders anfällig auf Stränden, da sie sich vorwiegend in den Flachwasserbereichen aufhalten (v. a. Salmoniden; Hunter et al. 1992). Gleichzeitig kann geeignetes Substrat die Gefährdung von Fischlarven der Salmoniden durch Verdriftung verringern, da sich die Tiere bis zu diesem Stadium in relativ grobkörnigem Sediment (Bachforelle: 0.6 bis 13 cm Korngrösse; Fischnetz 2004) entwickeln. Für adulte Fische spielen diese Effekte nur eine untergeordnete Rolle.

Die mit gewässerökologischen Untersuchungen erhobenen Daten aus den Schwallstrecken sollten mit Expertenwissen und Erkenntnissen aus der Literatur vervollständigt und interpretiert werden. Die Mehrheit der bekannten Forschungsarbeiten fokussierte auf die Auswirkungen von Schwall/Sunk oder unnatürlichen Abflussereignissen auf Fische und Forschungsergebnisse über das Makrozoobenthos, die Algen, Makrophyten und terrestrische Organismen sind deutlich untervertreten. Einige Erkenntnisse können jedoch zwischen unterschiedlichen Organismengruppen übertragen werden, falls deren Habitatsansprüche ähnlich sind.

3.2 Auswirkungen des Abflussanstiegs

3.2.1 Verdriftung von Organismen und organischem Material

Während dem Abflussanstieg nimmt die Fliessgeschwindigkeit und die Wassertiefe zu, wodurch die Scherkräfte, die Sohlenschubspannung und die Turbulenz erhöht werden. In der Folge werden Organismen verdriftet und ausgeschwemmt, die sich nicht auf dem Substrat halten können oder nicht genug starke Schwimmer sind um gegen die Strömung anzukommen. Drift kommt auch unter natürlichen Bedingungen vor und wird bei vielen Arten (Fische und einige Makroinvertebraten) durch Aufwanderung kompensiert. Bei Hochwasserereignissen ist die Drift jedoch deutlich erhöht („Katastrophendrift“) und kann bei täglichem Schwall das Ausmass der Aufwanderung deutlich übersteigen. Dies kann zu einer Auszehrung der Bestände der betroffenen Arten in der Schwallstrecke führen (Layzer et al. 1989, Schweizer et al. 2010). Längerfristig kann sich auch die Artenzusammensetzung der betroffenen Pflanzen- und Tiergruppen verändern, da sich die Arten in ihrer Sensibilität auf die Abflusszunahme und in ihren Reaktionsmöglichkeiten unterscheiden (Moog 1993, De Jalon et al. 1994, Bosco Imbert & Perry 2000, Baumann & Klaus 2003, Bernez et al. 2004). Durch die Auswaschung von Tieren und organischem Material (v. a. Detritus) wird ausserdem die Nahrungsgrundlage der verbleibenden Tiere reduziert, was deren Biomasse längerfristig ebenfalls verringern kann (Moog 1993).

Tabelle 3.1: Übersicht über die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie

Hydrologische Effekte von Schwall/Sunk	Hydromorphologische Effekte von Schwall/Sunk	Direkte Auswirkungen auf die Gewässerökologie ^{a)}	Negative (-) resp. positive (+) indirekte Auswirkungen auf die Gewässerökologie ^{b)}
Rascher Anstieg des Abflusses (Schwall)	Rasche Zunahme der Fließgeschwindigkeit Resuspension von Schwebstoffen	Verdriftung Auswaschen von organischem Material, das als Ressource dient Erhöhung der Trübung Reduktion der Wanderaktivität von migrierenden Fischen Mechanische Schädigung von Haut und Kiemen Abrasion von Organismen Reduktion der Primärproduktion Mechanische Schädigung	- - - - - - - +
Hoher Abfluss	Mobilisierung von Teilen der Gewässersohle Vibrationseffekte Veränderung der Wassertemperatur Veränderung der Konzentration von partikulären und gelösten Stoffen	Verringerung des Porenraums Verdriftung Fluchtreaktion und Standortwechsel von Fischen Veränderung der Aktivität Veränderung der Wachstumsraten Veränderung der Trübung Gasübersättigung Physiologischer Stress	- - - +/- +/- +/- - -
Rasche Abnahme des Abflusses (Sunk)	Abnahme der benetzten Fläche Aus sedimentieren der Schwebstoffe	Erhöhte Mortalität durch Stranden Blockieren in abgeschnittenen Gewässerbereichen Standortwechsel von Fischen Zunahme der inneren Kolmation Zunahme der äusseren Kolmation	- - - - -
Tiefer Abfluss	Geringe Wassertiefe und -volumen	Reduzierter Lebensraum Schnelle Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers	- +/-
Hohe Variabilität des Abflusses	Unnatürliche Hydrologie	Veränderung von Habitaten Verhaltensänderungen	- -

^{a)}: Einige Auswirkungen werden durch mehrere hydrologische Effekte verursacht. Sie werden jedoch nur bei jenen erwähnt, in denen sie schwergewichtig auftreten.

^{b)}: Indirekte Auswirkungen betreffen z. B. die Biomasse und Artenzusammensetzung der Gewässerorganismen

Eine sprunghafte Zunahme der Drift von Algen und Makroinvertebraten geht oft mit der Mobilisierung von Sedimenten auf der Gewässersohle einher, welches das Substrat dieser Organismengruppen bildet (Baumann & Schälchli 2002, Gibbins et al. 2007, Jones et al. 2011). Auch konnte in der Reuss eine deutliche Zunahme der Verdriftung ab dem Abflussgrenzwert festgestellt werden, ab welchem die Abrasion fädiger Aufwuchsalgen beginnt (BGF 2009). Tiere, welche die Algen als Habitat benützen, wurden ab diesem Grenzwert verdriftet.

Viele Tiere reagieren auf die schnelle Abflusszunahme und versuchen sich in Abschnitte mit geringer Strömung (z. B. Seitenarme) zurückzuziehen (Bell et al. 2001). Migrierende Fische zum Beispiel können Schwallereignissen teilweise ausweichen, in dem sie während der Sunkphase wandern und sich während dem Schwall in Vertiefungen der Gewässersohle oder in strömungsberuhigten Zonen der Gewässer zurückziehen. Dieser Effekt kann jedoch die Distanz der Aufwanderung von Fischen reduzieren. In einer Studie im Alpenrhein legten Seeforellen an Wochenenden bis zu 50% grössere Distanzen zurück als an den Wochentagen mit weitaus stärkeren Schwallereignissen (Mendez 2007). Da Fische gezwungen sind, während Schwallereignissen Refugien aufzusuchen haben sie unter Schwall/Sunk-Einfluss einen höheren Energieaufwand und können zusätzlich gegenüber Frassfeinden exponiert werden (Scruton et al. 2008).

Aufgrund ihrer geringeren Mobilität muss davon ausgegangen werden, dass die Ausweichmöglichkeiten für Tiere des Makrozoobenthos und junge Lebensstadien der Fische deutlich geringer sind als jene von adulten Fischen. Einige Arten haben jedoch die Möglichkeit, in die Sohlenzwischenräume auszuweichen (Dole-Olivier et al. 1997, Fischnetz 2004, Bruno et al. 2009) sofern die Substratzwischenräume (das Interstitial) nicht durch ausgeprägte innere und/oder äussere Kolmation blockiert sind. Diese Rückzugsmöglichkeit hängt jedoch auch von der Schwallanstiegsrate (Reaktionszeit) und der Gewässermorphologie sowie dem Körperbau der Tiere ab (Moog 1993, Bruno et al. 2009). So sind eher kleine und flexible Tiere mit zylindrischer Körperform in der Lage in Substratzwischenräume auszuweichen (Gayraud & Philippe 2001, Baumann & Meile 2004, Bruno et al. 2009). Im Experiment von Bruno et al. (2009) konnte ausserdem nachgewiesen werden, dass sich die Möglichkeiten ins Interstitial auszuweichen zwischen verschiedenen Lebensstadien der gleichen Makrozoobenthosarten unterscheiden. So sind kleine Larvenstadien von Baetiden (Eintagsfliegen) und Steinfliegen im Interstitial nachgewiesen worden, während grosse Larvenstadien vermehrt verdriftet wurden (Bruno et al. 2009).

Das Ausmass der Drift hängt von der Ausprägung der Schwallereignisse ab. Driftversuche in der Reuss haben gezeigt, dass die Menge verdrifteter Organismen des Makrozoobenthos mit dem Schwall/Sunk-Verhältnis des Erstschwalls und der Folgeschwalle zunimmt und während dem täglichen Erstschwall am grössten ist (s. Kapitel 9.2.4; BGF 2009). Ausserdem war die Drift in dieser Studie während des Schwallanstieges höher als während der Phase mit maximalem Abfluss, während der sie sich innerhalb relativ kurzer Zeit (1 - 2 h) wieder auf das Ausmass der Niedrigwasserphase reduziert hat. Während der Abflussreduktion war die Drift dann unbedeutend. Ähnliche Auswirkungen eines Schwalldurchgangs auf Äschenlarven konnten in Versuchsrinnen nachgewiesen werden, in denen der Anteil verdrifteter Tiere während dem Abflussanstieg deutlich grösser war, als während dem Maximalabfluss und die Verdriftung während der Abflussabnahme unbedeutend war (Schmutz 2012). Experimentelle Untersuchungen in der Linth (Limnex 2006), aber auch in künstlichen Fliessgewässern (Bosco Imbert & Perry 2000) haben ausserdem gezeigt, dass das Ausmass der Drift von der Abflussanstiegsrate abhängig ist, wahrscheinlich weil diese die Reaktionszeiten bestimmt. Diese Beziehung wird durch die Gewässermorphologie

beeinflusst, wobei eine natürlichere Morphologie die Abflussextreme und -änderungsraten dämpfen und die Verdriftung von Tieren reduzieren kann (Limnex 2006).

3.2.2 Resuspension von Schwebstoffen

Ab einem bestimmten Grenzwert kann der erhöhte Abfluss zu Resuspension und Transport von Feinsedimenten führen (Limnex 2006). Die Schwebstofffracht erhöht die Trübung des Wassers (ARGE Trübung Alpenrhein 2001, Baumann & Schälchli 2002) und kann neben der Verdriftung zur Abrasion und mechanischen Schädigung der exponierten Organismen führen (Baumann & Schälchli 2002). Dies betrifft vor allem sesshafte Organismen wie Algen aber auch besonders sensible Tiere, zum Beispiel solche mit exponierten Kiemen wie Fische und einige Arten des Makrozoobenthos (Berg & Northcote 1984, Shaw & Richardson 2001, Fischnetz 2004, Jones et al. 2011).

3.2.3 Mobilisierung der Gewässersohle

Steigt der Abfluss noch mehr an, kommt es in Sohlenbereichen mit kleinerem Substrat zu Umlagerungen der Sedimentoberfläche, wodurch die Mortalität von substratbewohnenden Organismen deutlich erhöht wird (Baumann & Meile 2004, Meile et al 2005). Laich von Bachforellen zum Beispiel wird in 7 - 25 cm Tiefe im Substrat abgelegt (Crisp 2000). Nach dem Schlüpfen verbringen die Dottersackbrütlinge weitere fünf bis sechs Wochen im Kiesbett (Elliott 1994), wobei die Entwicklungsdauer von der Wassertemperatur abhängig ist. Die Mortalität dieser Lebensstadien hängt dementsprechend davon ab, bis zu welcher Tiefe das Substrat während dem Schwalldurchgang umgeschichtet wird. Viele Arten des Makrozoobenthos, die sich oft im Kieslückenraum aufhalten, sowie Aufwuchsalgen, Periphyton und Makrophyten werden durch Substratbewegungen ebenfalls geschädigt.

Längerfristig können regelmässige Substratbewegungen so die Biomasse der betroffenen Organismengruppen reduzieren. Die Verarmung der Makrozoobenthosgemeinschaft ist eine weitere Folge, da diese ähnlich wie bei den Auswirkungen der Drift auf Arten reduziert wird, die tiefergelegene Substratzwischenräume erreichen können, um der Bewegung der oberflächennahen Schicht auszuweichen (Dole-Olivier et al. 1997, Gayraud & Philippe 2001). Dies sind vermehrt Arten mit kleinen Individuen und/oder solche mit einem zylindrischen, kugelförmigen oder flexiblen Körperbau (Gayraud & Philippe 2001, Baumann & Meile 2004, Bruno et al. 2009), wie zum Beispiel Oligochaeten und Chironomiden aber auch kleine Larvenstadien anderer Gruppen.

Hochwasserereignisse, die zu einem tiefgründigen Aufreissen der Sohle führen, können die innere Kolmation rückgängig machen und somit indirekt auch positive Auswirkungen auf die Gewässerökologie haben (Poff et al. 1997). Schwallereignisse sind jedoch in den meisten Fällen dafür nicht stark genug (Baumann & Meile 2004, Fette et al. 2007, Bruno et al. 2009, Schweizer et al. 2010).

3.3 Auswirkungen des hohen Abflusses

3.3.1 Vibrationseffekte

Ein hoher Abfluss, der nicht zu einem Aufreissen der Sohle führt, kann aufgrund von Vibrationseffekten zur Verdichtung des Sediments beitragen und die Lebensqualität des Substrats zusätzlich verringern (Fette 2005, Meile et al. 2005). Ausserdem wird durch den hohen Abfluss das Substrat der Wasserwechselzone tendenziell verdichtet, was seine

Habitatseignung für terrestrische Organismen (z. B. Arthropoden) bei niedrigem Abfluss reduziert (Paetzold et al. 2008). Dies trägt zusätzlich zum periodischen Trockenfallen und Überfluten dazu bei, dass die Wasserwechselzone in Schwallstrecken als Lebensraum für aquatische und terrestrische Organismen ungeeignet ist.

3.3.2 Veränderung der Wassertemperatur

Kurzfristige Temperaturänderungen können durch Schwall/Sunk verursacht werden, wenn sich die Temperatur von Betriebs- und dem Restwasser unterscheidet (Limnex 2006, Zolezzi et al. 2011). Im Winter ist das Betriebswasser oftmals wärmer als das Restwasser, wenn es aus dem Tiefenwasser von Speicherseen stammt, wodurch sich bei dessen Einleitung die Wassertemperatur in der Schwallstrecke erhöht (Meier & Wüest 2004, Frutiger 2004, Fette et al. 2007, Jackson et al. 2007, Zolezzi et al. 2011). Im Sommer führt die Einleitung von Tiefenwasser hingegen zu tieferen Temperaturen in der Schwallstrecke.

Der plötzliche Anstieg der Wassertemperatur im Winter kann unabhängig von den hydrologischen Einflüssen zu einer erhöhten Drift von Makrozoobenthos führen (Carolli et al. 2012) und die Fische zu Fluchtreaktionen und Standortwechseln veranlassen. Die höhere Temperatur kann sich hingegen positiv auf die Reaktionsfähigkeit und Mobilität der Tiere auswirken, was die Gefahr des Strandens reduziert. Dies ist wahrscheinlich für juvenile Fische besonders relevant, die sich bei tiefen Temperaturen bevorzugt in Substratnähe aufhalten (Bradford 1997). Längerfristig können sich durch diese Temperatureffekte Wachstumsraten, z. B. von Fischlaich beschleunigen und heimische Arten durch solche ersetzt werden, die besser an die neuen Temperaturverhältnisse angepasst sind (Meier et al. 2004, Jackson et al. 2007).

Da der natürliche Abfluss (und die Restwassermenge) in den meisten Flüssen im Winter geringer ist, dürften in dieser Jahreszeit die Auswirkungen des eingeleiteten Wassers auf die Wassertemperatur in der Schwallstrecke grösser sein als im Sommer. Der Einfluss des turbinieren Wassers auf die Wassertemperatur der Schwallstrecke wird durch die Eigenschaften der Kraftwerke bestimmt, wie der relativen Menge des eingeleiteten Wassers, der Tiefe der Wasserentnahme aus den Speicherseen sowie der Zusammensetzung des Restwassers (z. B. dessen Verhältnis von Grundwasser zu Oberflächenwasser).

3.3.3 Veränderung der Konzentration von partikulären und gelösten Stoffen

Der Kraftwerksbetrieb kann sich auf unterschiedliche Weise auf den Eintrag von Schwebstoffen auswirken (Portmann et al. 2004, Anselmetti et al. 2007). Der Eintrag von Feinsedimenten aus den Speicherseen in die Schwallstrecke hängt von der Höhe der Ausleitung des Betriebswassers aus dem See und der Betriebsweise der Kraftwerke ab. So halten zum Beispiel die Speicherseen der KWO insgesamt 85% der Sedimente zurück, wenn man den Sedimenttransport in der Hasliaare mit jenen in den Zuflüssen oberhalb der Speicherseen vergleicht (Anselmetti et al. 2007). Allerdings zeigt ein saisonaler Vergleich der gleichen Studie, dass die Menge transportierten Materials in der Hasliaare im Winterhalbjahr (November bis März) durch den Kraftwerksbetrieb deutlich erhöht wird, vorwiegend aufgrund der Einleitung von trübem Wasser und der Resuspension in der Schwallstrecke. Absolut ist der Schwebstofftransport im Sommerhalbjahr grösser als im Winter, was auf den generell höheren Abfluss und die Gletscherschmelze zurückzuführen ist (Meile et al. 2005, Anselmetti et al. 2007). Auch in der Rhone wird die Schwebstofffracht durch den Kraftwerksbetrieb deutlich erhöht und spiegelt die Abflussschwankungen wider (Portmann et

al. 2004, Limnex 2006). Der Transport der kleinsten Partikel geschieht über die gesamte Wassertiefe verteilt (Linxex 2006), während die grösseren Sedimentfraktionen in Substratnähe transportiert werden und bei höheren Abflüssen zum Transport von Rollkies und der Mobilisierung der Gewässersohle führen kann.

Die Trübung kann die Nahrungsaufnahme von auf Sicht jagender Tiere (wie die meisten Salmoniden) einschränken (Shaw & Richardson 2001) und generell den physiologischen Stress von Tieren erhöhen (EIFAC 1965, Fischnetz 2004). Entsprechend den Grenzwerten von EIFAC (1965) sind bei einem Schwebstoffgehalt von bis 25 mg/l keine negativen Auswirkungen auf Fische zu erwarten, bis 80 mg/l geringe und ab 80 mg/l beträchtliche negative Auswirkungen, die sich auch in der Biomasse niederschlagen. Beispielhaft können die Untersuchungen in der Linth aufgeführt werden, während denen in einem Schwall Schwebstoffgehalte zwischen 60 und 80 mg/l durchaus üblich waren; in einzelnen Messungen wurden auch Werte von deutlich über 100 mg/l nachgewiesen (Linxex 2006).

Durch die Trübung wird die einfallende Lichtmenge der substratbewohnenden Pflanzen reduziert mit Auswirkungen auf deren Photosyntheserate und Wachstum (Lloyd et al. 1987). Viele Pflanzen haben aber die Möglichkeit innerhalb von kurzer Zeit die Effizienz der Photosynthese zu erhöhen und so ihr Wachstum den beeinträchtigten Bedingungen anzupassen (Parkhill & Gulliver 2002). Ähnlich wie für andere durch Schwall/Sunk beeinflusste Parameter hängt das Ausmass der Störung der Gewässerorganismen durch Schwebstoffe von der Intensität und der Dauer des Schwallereignisses und somit von der Menge turbinierten Wassers pro Zeiteinheit ab.

Tiefenwasser von Speicherseen ist oftmals gesättigt an Gasen. Wenn dieses Wasser nach der Turbinierung in die Schwallstrecke eingeleitet wird, kann es aufgrund der deutlich niedrigeren Druckverhältnisse zu einer Gasübersättigung des Wassers kommen. In Norwegischen Schwallstrecken wurden bis zu 172% Sättigung gemessen (Pulg 2012), im Columbia River (USA), der diesbezüglich ebenfalls gut untersucht ist, bis zu 125% (Tanner et al. 2009). Schon geringe Gasübersättigung kann die Gewässerökologie (Fische und Makroinvertebraten) schädigen (Weitkamp & Katz 1989). Bei den betroffenen Tieren kann es zur Bildung von Gasblasen im Körpergewebe (z. B. den Kiemen) und in Blutgefässen kommen, die zu tödlichen Gewebeschäden führen können. Diese Effekte können schon ab einer Sättigung von 115% auftreten. Die Übersättigung ist sehr stabil und dürfte auch über eine lange Fliessstrecke nicht ausgeglichen werden, selbst wenn diese turbulent ist (Weitkamp & Katz 1989). Somit ist es fraglich, ob dieser Effekt mit Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen reduziert werden kann (ausser der vollständigen Ableitung des Schwalls in einen See). Wie stark kraftwerksbedingte Gasübersättigung in Schweizerischen Schwallstrecken verbreitet ist, ist nicht bekannt und wurde in den analysierten Fallstudien nicht untersucht. Kenntnisse über die Verbreitung dieses Phänomens in der Schweiz sowie die Reduktion der Übersättigung mit Sanierungsmassnahmen müssten mit zukünftigen Fallstudien und weiteren Forschungsprojekten erarbeitet werden.

3.4 Auswirkungen der Abflussabnahme

3.4.1 Abnahme der benetzten Fläche

Während der Abflussabnahme fallen die Gewässerbereiche der Wasserwechselzone (d. h. die Fläche der Uferzone, welche bei Schwall überflutet wird und bei Sunk trockenfällt) trocken und Organismen, die der Wasserlinie nicht folgen können, stranden. Gestrandete Organismen sind in ihrer Mobilität stark eingeschränkt und durch austrocknen, gefrieren oder

durch terrestrische Frassfeinde stark gefährdet. Das Ausmass des Stranden hängt neben der Sunkrate (Perry & Perry 1986, Saltveit et al. 2001, Halleraker et al. 2003, Nagrodski et al. 2012) von weiteren Eigenschaften der Schwallstrecke ab (Harby 2004, Nagrodski et al. 2012). Einen starken Einfluss auf das Stranden hat die Gewässermorphologie, was durch deren Bedeutung für die Rückgangrate der benetzten Fläche deutlich wird (Limnex 2006). Die Rückgangrate ist in Gewässerabschnitten mit vielfältiger Morphologie in der Regel grösser. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Gefahr zu Stranden für Fische bei einer Sohlenneigung von weniger als 5% deutlich zunimmt (Young et al. 2011 und Referenzen darin). Die Drift während dem Schwall hat ebenfalls einen Einfluss auf das Stranden von Organismen, da bei hoher Drift mehr Tiere auf die Wasserwechselzone geschwemmt werden und dann beim folgenden Abflussrückgang stranden (Perry & Perry 1986, Limnex 2006). Auch die Korngrösse des Substrates spielt eine Rolle, wobei die Gefahr des Strandens bei größerem Substrat grösser ist aufgrund der Bildung von Wasserflächen in den Substratzwischenräumen und dem vorwiegend vertikalen Rückzug des Wassers im Vergleich zu feinem Substrat (Hunter 1992, Young et al. 2011).

Die Gefahr des Strandens und Trockenfallen ist aber auch abhängig von den Eigenschaften und Verhaltensweisen der Arten und Lebensstadien der Gewässerorganismen, da sie sich in der Benützung des Substrats unterscheiden. Die Gefahr auszutrocknen ist für Fischlaich, der in der Wasserwechselzone abgelegt wurde natürlich am Grössten. Aber auch Larven und Jungstadien der Bachforelle und der Äsche sind gefährdet, da sie im Vergleich zu erwachsenen Fischen näher an der Substratoberfläche und in seichten Bereichen der Uferzone aufhalten (Hunter 1992, Bradford 1997, Baumann & Klaus 2003). Zusätzlich hängt das Strandungsrisiko von der Aktivität der Tiere ab, die von der Temperatur beeinflusst wird und im Winter aufgrund der tiefen Wassertemperaturen relativ gering ist (Saltveit et al. 2001, Halleraker et al. 2003). In Untersuchungen mit juvenilen Forellen konnte auch gezeigt werden, dass wiederholte Schwallereignisse einen Gewöhnungseffekt haben können, wodurch die Gefahr des Strandens nach dem Erstschwall am Grössten ist, nach den Folgeschwallen aber abnimmt (Harby et al. 2004).

Bei Schwall oder Hochwassern ist die seitliche Anbindung von Nebengerinnen (z. B. Seitenarme, Überschwemmungsflächen, Senken) deutlich grösser als bei Niedrigwasser. Tiere können bei hohem Abfluss entweder aktiv oder passiv solche Gewässerbereiche erreichen, die bei Niedrigwasser nicht erreichbar sind. Bei Sunk werden diese Gewässerbereiche wieder vom Hauptgerinne abgetrennt und die Tiere darin blockiert. Aufgrund des fehlenden Wasseraustausches können sich die physikalischen, chemischen und biologischen Bedingungen in diesen Gewässerbereichen ändern (u. a. Sauerstoffabnahme, Temperaturveränderung, Ansammlung von chemischen Stoffen, Austrocknen, weniger Rückzugmöglichkeiten vor Fressfeinden), wodurch die darin blockierten Organismen die Dauer bis zum nächsten Schwallereignis und erneuten Anbindung an das Hauptgerinne oft nicht überleben (Becker et al. 1982, Hunter 1992). Die Gefahr durch Blockieren wird im Gegensatz zu jener des Strandens weniger durch die Sunkrate kontrolliert, als durch die Schwall/Sunk-Amplitude, welche bestimmt wie viele Nebengewässer bei Hochwasser mit dem Hauptgerinne verbunden sind (Young et al. 2011).

3.4.2 Aussedimentieren der Schwebstoffe

Die Schwebstoffe, die als Folge von Schwallereignissen und dem unnatürlichen Abflussregime in der Schwallstrecke aufgewirbelt und transportiert werden, können während dem Abflussrückgang aussedimentieren und zur Kolmation der Gewässersohle führen (Schälch-

li 1993). Man unterscheidet dabei zwischen innerer Kolmation bei der sich die Feinsedimente in den Substratzwischenräumen ablagern und äusserer Kolmation, als Folge einer Ablagerung der Feinsedimente auf der Substratoberfläche.

Das Ausmass der **inneren Kolmation** in einem bestimmten Gewässerabschnitt hängt unter anderem vom hydraulischen Potential ab, also der Grösse, die beschreibt, ob an einer bestimmten Stelle das Oberflächenwasser in das Substrat und das Grundwasser fliesst („downwelling“) oder in die gegenläufige Richtung („upwelling“). Einströmendes Oberflächenwasser transportiert jedoch nicht nur Feinsedimente sondern auch Sauerstoff in den Porenraum. Im Gegensatz dazu kann aus dem Grundwasser und dem Porenraum aufsteigendes Wasser mit gelösten Nährstoffen angereichert sein. Diese Faktoren beeinflussen die Eignung des Porenraums und der Gewässersohle als Lebensraum. Durch innere Kolmation gehen somit Habitate der Organismen des Interstitials aber auch des Benthos (Bruno et al. 2009) und der Fische verloren (Cocchiglia et al. 2012). Dadurch kann die Abundanz und Biomasse und in gewissen Fällen auch die Artenzusammensetzung der betroffenen Organismen in einem bestimmten Sohlenabschnitt reduziert werden (Bo et al. 2007). Bei starker innerer Kolmation ist auch der Austausch zwischen dem Oberflächenwasser und dem Grundwasser reduziert, wodurch sich die Grundwasserneubildung verlangsamt, mit negativen Auswirkungen auf die Organismen der Grundwasser- und Upwellingzone.

Die **äussere Kolmation** wirkt sich negativ auf die Lebensraumeignung der Substratoberfläche aus, indem der Zugang zu stabilem Substrat erschwert wird oder Tiere durch Feinsedimente bedeckt werden. Da solch kleine Sedimentfraktionen schon bei geringen Abflussänderungen umgelagert werden, sind diese Flächen für viele Organismen (z. B. Algen und Insektenlarven) als Lebensraum ungeeignet (Hauer & Habersack 2012). In ihrer Untersuchung konnten Hauer & Habersack (2012) in Ablagerungsbereichen von Feinsedimenten (Buhnenfelder) nur 2 - 5% der Makroinvertebratenbiomasse nachweisen im Vergleich zu Bereichen mit grobkörnigem Substrat (Kiesbänke) und wichtige Insektenordnungen (z. B. Eintags-, Stein- und Köcherfliegen) und Gammariden waren nicht vertreten. Die Bedeckung durch Feinsedimente verringert die Sauerstoffzufuhr für betroffene Tiere und erhöht die Mortalität, wenn sie sich nicht ausgraben können (Jones et al. 2011). Verschiedene Tierarten unterscheiden sich in ihrer Empfindlichkeit auf die Bedeckung durch Feinsedimente (Jones et al. 2011) wodurch sich die Artenzusammensetzung von Makroinvertebraten in den betroffenen Abschnitten der Schwallstrecke verändern dürfte.

3.5 Auswirkungen des tiefen Abflusses

Durch den tiefen Abfluss wird die dauerhaft benetzte Fläche, welche aquatischen Organismen zu Verfügung steht, reduziert. Substratflächen, die durch Schwall/Sunk periodisch überflutet werden und trocken fallen (die Wasserwechselzone) bieten sehr ungünstige Lebensraumbedingungen für Fische und Makroinvertebraten, wobei erstere eher die Möglichkeit haben, der Uferlinie zu folgen. Makroinvertebraten in der Wasserwechselzone, die bei Schwall auf die Uferbereiche gedriftet wurden stranden bei Sunk, weshalb die Wasserwechselzone eine sehr geringe Besiedlungsdichte aufweist (Harby et al. 2004). Die Wasserwechselzone kann während der Niedrigwasserphase auch nur von wenigen angepassten terrestrischen Organismen (gewisse Spinnen- und Laufkäferarten; Paetzold et al. 2008) genutzt werden.

Durch die geringe Wassermenge während Phasen mit tiefem Abfluss haben Umwelteinflüsse stärkere Auswirkungen auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Wassers. Die Erwärmung durch Sonneneinstrahlung aber auch die Abkühlung vollzieht sich auf-

grund der geringeren Wassertiefe schneller als bei hohem Abfluss. Diese Effekte auf die Temperatur geschehen jedoch in den meisten Schwallstrecken langsamer, als die Temperaturveränderung durch das eingeleitete Wasser. Einträge von Chemikalien und Schadstoffen aus dem Zwischeneinzugsgebiet erreichen bei tiefem Abfluss höhere Konzentrationen im Wasser der Schwallstrecke. Es ist jedoch zu erwarten, dass ihre Auswirkungen bis zum nächsten Schwallereignis und der dann eintretenden Verdünnung durch die Durchmischung des Wassers, aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen Schwallereignissen, in den meisten Fällen gering sein dürften.

3.6 Hohe Variabilität des Abflusses

Neben den kurzfristigen Auswirkungen eines Schwalldurchgangs beeinflusst Schwall/Sunk das Abflussregime des beeinträchtigten Gewässers. Auch natürliche Flusssysteme sind Abflussschwankungen und Hochwassern unterworfen; dies sind wichtige Eigenschaften natürlicher Ökosysteme, welche die Struktur der Organismengemeinschaft mitbestimmen (Resh et al. 1988, Poff et al. 1997, Bunn & Arthington 2002, Naiman et al. 2008). Besonders deutlich wird die Auswirkung solcher Ereignisse bei der räumlichen Verteilung von Sediment und Habitaten aber auch der aquatischen Pflanzen (Franklin et al. 2008). Durch Schwall/Sunk wird die Häufigkeit und Intensität der Abflussschwankungen jedoch deutlich erhöht und die Hydrologie insgesamt gestört. Ausserdem führt der Kraftwerkbetrieb aufgrund der Stauhaltung der Speicherseen zu einer Reduktion der natürlichen Hochwasser. Durch die Wassernutzung und die resultierende unnatürliche Hydrologie wird somit einer der wichtigsten Einflussfaktoren der Verteilung der Organismen in der Schwallstrecke und anderen Gewässerabschnitten gestört, was zu einer standortfremden Pflanzen- und Tiergemeinschaft führen kann.

Neben der Verteilung und Anordnung von Habitaten beeinflusst die Hydrologie auch das Verhalten von Fliessgewässerorganismen. Abflussschwankungen können die Nahrungsaufnahme von Bachforellen reduzieren (Flodmark et al. 2004). Allerdings konnten Auswirkungen auf das Wachstum und soziale Interaktionen (Dominanzstrukturen) nicht nachgewiesen werden (Flodmark et al. 2006). Fische können auch in der Eiablage gestört werden, was sich auch ohne Trockenfallen oder Aufreissen der Gewässersohle in geringeren Bruterfolgen manifestiert (Young et al. 2011). Für einige Fliessgewässerorganismen sind Hochwasserereignisse ausserdem Auslöser für Eiablage, Schlüpfen oder Migrationen (Young et al. 2011) - Verhaltensweisen, die durch das unnatürliche Abflussregime ebenfalls gestört werden.

Kapitel 4

Übersicht über Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen

Die ausgewerteten Fallstudien umfassen vielfältige Ansätze, Schwall/Sunk in den betroffenen Flüssen zu verringern. Die Erkenntnisse aus den Fallstudien wurden mit Hilfe der Literatur und Expertenwissen ausgewertet und ergänzt. Es bestehen verschiedene bauliche und betriebliche Möglichkeiten zur Sanierung von Schwall/Sunk. Für die konkrete Sanierungsplanung müssen die geeigneten Massnahmen unter Berücksichtigung der lokalen Bedingungen entwickelt werden. Grundsätzlich soll die Sanierung mit baulichen Massnahmen geschehen, da sie den Betrieb des Kraftwerks im Gegensatz zu betrieblichen Massnahmen nicht einschränken. Aus diesem Grund können betriebliche Massnahmen auch nur auf Antrag der Kraftwerksbetreiber einbezogen werden (Art. 39a GSchG). Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die möglichen Sanierungsmassnahmen und ist unterteilt in allgemeine Bemerkungen zu Sanierungsmassnahmen und die Beschreibung von baulichen und betrieblichen Massnahmen.

4.1 Allgemeine Bemerkungen

Da Schwall/Sunk in einem Fliessgewässer durch die Einleitung von turbinierem Wasser über einen sehr kurzen Zeitraum verursacht wird, zielen Sanierungsmassnahmen primär darauf ab, das Volumen des pro Zeiteinheit eingeleiteten Wassers zu reduzieren oder den Schwall in ein Gewässer (z. B. See oder Stauraum eines Flusskraftwerks) mit einem grossen Volumen umzuleiten. Dadurch können die Abflussextrême (Schwall- und Sunkabfluss) und Abflussänderungsraten (Abb. 4.1) im Fliessgewässer gedämpft und die negativen Auswirkungen auf die Gewässerökologie reduziert werden (Moog 1993, Parasiewicz et al. 1998, Richter & Thomas 2007). Die Dämpfung von eingeleitetem Wasser kann durch bauliche oder betriebliche Massnahmen erreicht werden. Betriebliche Massnahmen verursachen jedoch eine Beeinträchtigung des Kraftwerksbetriebs, die Einschränkungen in der produzierten Strommenge oder der Flexibilität der Produktion über die gesamte Laufzeit der Kraftwerke mit sich bringt. Dadurch sind bauliche Massnahmen (z. B. Beruhigungsbecken) in der Regel wesentlich kosteneffizienter (Minor & Möller 2007). Untersuchungen am Alpenrhein konnten zeigen, dass die Kosten für betriebliche Massnahmen (inkl. Kosten durch Reduktion der Leistung im Netz, die wieder zugebaut werden muss) um einen Faktor 1.3 bis 3.5 höher liegen, als die Kosten baulicher Massnahmen mit vergleichbarer Wirkung (Schmocker et al. 2007). Andere Studien kommen zum Schluss, dass die Kosten für be-

triebliche Massnahmen um bis zu 50% grösser sind als bauliche Massnahmen (Schmocker et al. 2007). Aus diesen Gründen werden im revidierten Gewässerschutzgesetz bauliche Sanierungsmassnahmen vorgeschrieben (Art. 39a GSchG). Jedoch können auf Antrag der Kraftwerksbetreiber auch betriebliche Massnahmen in Betracht gezogen werden. In einigen Fällen (z. B. Kraftwerke Linth-Limmern) ist eine Kombination von baulichen und betrieblichen Massnahmen sinnvoll (s. Kapitel 9.2.2).

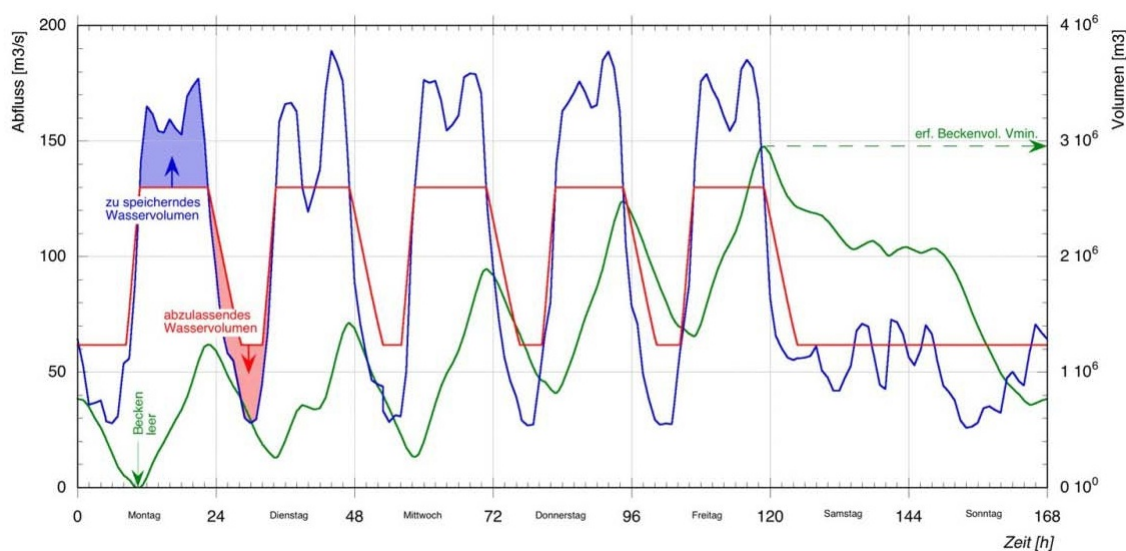


Abbildung 4.1: Beispiel einer gedämpften Abflussganglinie (aus Baumann et al. 2012). In diesem Beispiel könnte das Schwall/Sunk-Verhältnis während einer ganzen Woche durch ein Beruhigungsbecken mit einem Volumen von ca. 3 Mio m³ von ca. 7:1 auf etwas über 2.1:1 reduziert werden. Gleichzeitig könnten weitere Schwall/Sunk-Parameter wie Abflussextreme und Abflussänderungsraten deutlich verbessert werden (rote Linie).

Bei der Planung der Massnahmen und deren räumlichen Dimensionen müssen neben betrieblichen Vorgaben (z. B. der Menge an turbinierem Wasser) auch die Eigenschaften der Schwallstrecke (wie Hydrologie, Hydraulik, Morphologie und Schutzwürdigkeit der Ökosysteme) berücksichtigt werden. So sind die Auswirkungen einer bestimmten Menge eingeleiteten Wassers unter Anderem abhängig von der Restwassermenge und der Morphologie der Schwallstrecke.

Neben den Eigenschaften des Kraftwerks und der Schwallstrecke spielen aber auch sozio-ökonomische Rahmenbedingungen, die zu gegensätzlichen Interessen bei der Nutzung des Gewässers führen können, eine entscheidende Rolle in der Planung und Beurteilung der Sanierungsmassnahmen. Für den Kraftwerksbetreiber und die Anrainer können bauliche Sanierungsmassnahmen neben der Dämpfung von Schwall/Sunk aber auch weitere Vorteile bieten, zum Beispiel durch zusätzliches Speichervolumen für Pumpspeicherkraftwerke (AXPO 2010, Illwerke vkw 2009), direkte Stromproduktion (Schweizer et al. 2008) oder anderweitige Nutzung des geschaffenen Wasserkörpers (Heller et al. 2010). Diesen sekundären Effekten der Sanierungsmassnahmen muss in der Planung ebenfalls Rechnung getragen werden.

Wenn mehrere Kraftwerke das turbinierete Wasser in das gleiche Gewässer einleiten, können sich die Abflussschwankungen überlagern und zu komplexen Schwall/Sunk-Effekten führen. Dieser Umstand muss bei der Planung der Sanierung berücksichtigt werden, was

auch durch das Gewässerschutzgesetz vorgeschrieben wird (Baumann et al. 2012).

Je nach Eigenschaften des Kraftwerks und der Schwallstrecke ist auch eine Kombination mehrerer Massnahmen sinnvoll. Die Umsetzung mehrerer Massnahmen hätte aufgrund der erweiterten betrieblichen Optionen komplexe Folgen auf das Abflussregime, die in der Planungsphase ebenfalls abgeschätzt werden müssten. Aus den genannten Gründen ist zu Beginn der Planung eine sorgfältige Diskussion und Wirkungsabschätzung möglichst vieler Massnahmen anzustreben, wie es auch von der Vollzugshilfe des BAFU vorgeschlagen wird (Baumann et al. 2012).

Zusätzlich zum negativen Einfluss von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie ist diese in den meisten Fällen durch weitere Degradierungen des Gewässers beeinträchtigt. Verarmte Gewässermorphologie ist dabei die am meisten verbreitete Folge von flussbaulichen Massnahmen wie Kanalisierungen oder Flussbegradigungen. Als Folge dieser vielfältigen Beeinträchtigungen sind Massnahmen zur Sanierung von Schwall/Sunk in vielen Fällen nicht ausreichend, um eine natürliche und standortgerechte Gewässerökologie wiederherzustellen (Fette et al. 2007, IRKA 2012), zusätzlich können die Auswirkungen von Schwall/Sunk durch Flussrevitalisierungen modifiziert werden (ins Positive und ins Negative). Die Morphologie der Schwallstrecke kann sich hingegen als Folge von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen auch ohne menschliches Zutun sondern aufgrund der neuen Abflussbedingungen ändern. Dieser Effekt muss bei der Definierung des sogenannten absehbaren Zustandes während der Planung der Sanierungsmassnahmen ebenfalls berücksichtigt werden (Baumann et al. 2012).

Wie aufgrund der Analyse der Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie deutlich wird (s. Kapitel 3), interagiert die Sensitivität der verschiedenen Organismengruppen, wodurch sich der Effekt einer Massnahme direkt günstig auf eine Organismengruppe auswirken kann, jedoch nur indirekt positiv oder sogar negativ auf eine andere Gruppe. Daher sollten während der Planung von Sanierungsmassnahmen deren Auswirkungen auf verschiedene Organismengruppen beurteilt werden. Ausserdem soll der Sensitivität unterschiedlicher Lebensstadien der Gewässerorganismen und somit den saisonalen Unterschieden der Sensitivität bei der Planung Rechnung getragen werden (s. Kapitel 9.2.2).

Aufgrund der Komplexität durch das Zusammenspiel dieser Faktoren ist die Wirkung und die Kosteneffizienz von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen nur schwierig abzuschätzen. Die grossen Kosten, die mit solchen Sanierungsprojekten einhergehen und die sehr eingeschränkten Anpassungsmöglichkeiten nach der Umsetzung der Projekte, rechtfertigen jedoch einen grossen Aufwand für ihre Planung und Wirkungsabschätzung.

4.2 Bauliche Sanierungsmassnahmen

Bauliche Massnahmen zielen darauf ab, ein Volumen zu schaffen, in dem ein Teil des turbinieren Wassers zurückgehalten und dann über einen längeren Zeitraum in die Schwallstrecke abgegeben werden kann, als dies mit einer direkten Einleitung möglich wäre (Abb. 4.1). Mit einer geeigneten Steuerung ermöglichen diese Rückhaltevolumen eine Reduktion der Abflussänderungsraten und bei sehr grossen Volumina auch eine Dämpfung der Abflussextreme (Schwallspitzen und Sunkabfluss). Ein weiterer Ansatz von baulichen Massnahmen besteht darin, den Schwall in ein Gewässer einzuleiten, das ein im Vergleich zum turbinieren Wasser viel grösseres Volumen oder Abfluss aufweist und aus diesem Grund nur geringe relative Pegelschwankungen erfährt. Zur Umsetzung von beiden Ansätzen gibt es verschiedene Möglichkeiten, deren Wahl und Ausgestaltung durch die lokalen Bedingungen bestimmt wird.

4.2.1 Beruhigungsbecken, -kavernen

Mit Beruhigungsbecken oder -kavernen kann der Schwall, der durch die Stromproduktion entsteht, aufgefangen werden, um das turbinierte Wasser dann gedämpft in den Fluss einzuleiten (Abb. 4.2). Bei geeigneter Steuerung des Kraftwerkbetriebs und des Betriebs des Beruhigungsbeckens resp. -kaverne kann diese Sanierungsmassnahme die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Hydrologie deutlich dämpfen (Schwall/Sunk-Verhältnis, Abfluss-extreme sowie Abflussänderungsraten; s. Kapitel 9.2.4). Für eine vollständige Verhinderung von Schwall/Sunk über längeren Zeitraum (mehrere Wochen) ohne zusätzliche betriebliche Anpassungen müssten Beruhigungsbecken oder -kavernen extrem grosse Volumina aufweisen. So können auch die Schweizweit grössten Beruhigungsbecken (Tierfeld und Linthal der Kraftwerke Linth-Limmern) mit einem kombinierten Volumen von 770'000 m³ den Schwall nur ungenügend dämpfen und müssen mit betrieblichen Massnahmen kombiniert werden (s. Kapitel 9.2.2).

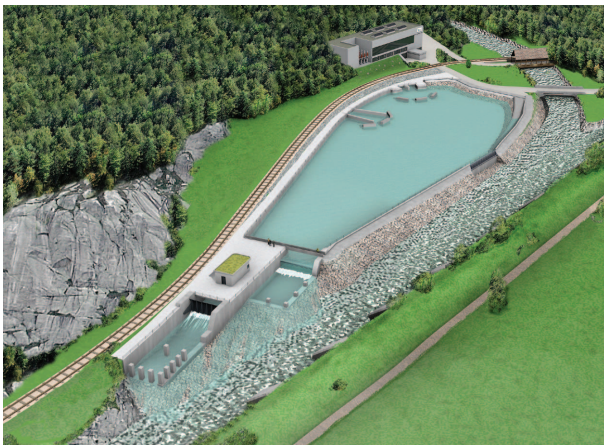


Abbildung 4.2: Geplantes Beruhigungsbecken der Kraftwerke Oberhasli in Innertkirchen (aus Kraftwerke Oberhasli 2011).

gen der turbinierten Wassermenge in den meisten Fällen ab (Meile et al. 2005, Richter & Thomas 2007).

Die Kosten für Beruhigungsbecken variieren je nach lokalen Begebenheiten, dürften aber in den meisten Fällen deutlich unter den finanziellen Einbussen durch betriebliche Massnahmen liegen. Eine Schweizweite Gegenüberstellung von mehreren Beruhigungsbecken hat einen Mittelwert von 70 Fr. pro m³ Beckengrösse ergeben, wobei die Baukosten pro m³ von Becken mit einem Volumen unter 50'000 m³ überproportional hoch waren (Schmocker et al. 2007) und die Kosten erwartungsgemäss mit unterschiedlicher Bauweise der Becken stark variierten. Hinzu kommen jedoch noch die Aufwendungen zur Deckung des Landbedarfs von Beruhigungsbecken, die oftmals in Tälern gebaut werden müssen, in denen die verfügbare Fläche auch für andere Nutzungen schon äusserst knapp ist. Die Landknappheit wurde dementsprechend auch in den meisten untersuchten Fallstudien als limitierender Faktor bei der Planung der Beruhigungsbecken angeführt (s. Kapitel 9.2).

Anhand von Randbedingungen (Ganglinien und als zulässig erachtete Schwall/Sunk-Parameter) kann das für eine ausreichende Schwalldämpfung benötigte Volumen des Beruhigungsbeckens abgeschätzt werden (Abb. 4.1; Baumann et al. 2012). Die Definition von „ausreichend“ muss unter Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen und von Vorteil im partizipativen Verfahren erarbeitet werden (z. B. Schweizer et al. 2012). Durch die Auswirkung mehrerer Kraftwerkzentralen nimmt das benötigte Gesamtvolumen für den Rückhalt des Schwalls mit zunehmender Anzahl einleitender Zentralen, vielfältigen Beckensteuerungsmöglichkeiten und zunehmender Genauigkeit der Vorhersa-

4.2.2 **Direktableitung des Schwall in einen See**

Unter gegebenen lokalen Bedingungen kann der Bau eines Kraftwerks mit direkter Einleitung des turbinierten Wassers in einen See in Betracht gezogen werden. Durch das grosse Volumen eines Sees werden die künstlichen Abflussänderungen viel stärker gedämpft, als wenn das turbinierte Wasser in einen Fluss geleitet würde. In einem Pumpspeicherkraftwerk kann ausserdem das Wasser des unterhalb liegenden Sees in den Speichersee gepumpt werden (z. B. Kraftwerk Hongrin-Léman). Über die Auswirkungen von Einleitungen auf Eigenschaften der Seen wie die Sedimentstabilität oder das Mischungsverhalten ist noch sehr wenig bekannt (s. aber Schmid et al. 2008, Schmid & Wüest 2009, Bonalumi et al. 2012). Diese Faktoren hängen aber von der Grösse des Sees im Vergleich zur Menge an eingeleitetem Wasser und saisonalen Unterschieden der Wasserqualität ab und müssen im Rahmen der detaillierten Planung der Sanierungsmassnahme berücksichtigt werden.

Die direkte Einleitung des Schwall in einen See kann durch eine Kraftwerkzentrale am Ufer des Sees geschehen, die mit einer Druckleitung mit den oberhalb liegenden Installationen verbunden wird. Dies ist sinnvoll, wenn sich der See in der Nähe der Speicherseen befindet, so dass die horizontalen Distanzen möglichst klein sind, wie dies zum Beispiel für die Kraftwerke Lagobianco (s. Kapitel 9.2.3; Lagobianco 2011) und Hongrin-Léman gegeben ist. In den meisten anderen Fällen (z. B. Kraftwerke Oberhasli, Kraftwerke Linth-Limmern und Kraftwerk Amsteg) ist diese Massnahme nicht sinnvoll, weil die horizontale Distanz zum nächstgelegenen grösseren See sehr gross ist (s. Kapitel 9.2). Durch den enormen baulichen Aufwand für eine Druckleitung der notwendigen Länge und die auf dieser Länge entstehenden Reibungsverluste dürfte die Kosteneffizienz in den meisten Fällen sehr ungünstig ausfallen.

Zwar könnte die gleiche Sanierung mit oberirdischen Kanälen erreicht werden. Dies ist jedoch ebenfalls mit einem oftmals unrealistischen baulichen Aufwand verbunden. Ausserdem ist mit negativen Auswirkungen auf das Landschaftsbild zu rechnen. Eine naturnahe Gestaltung dieses Kanals dürfte auch nur selten den gewünschten Erfolg auf seine Gewässerökologie und sein Landschaftsbild bringen, da nur der Schwall abgeleitet würde und der Kanal zwischen zwei Schwallereignissen trocken fallen würde, falls kein Restwasser aus der Schwallstrecke abgeleitet werden soll, das dort während einem Grossteil des Winters sowieso schon limitiert ist.

Die gleichen Überlegungen betreffen Ableitungen in weitere Arten von Auffangvolumen zum Rückhalten und der graduellen Abgabe des Schwall. So könnte das turbinierte Wasser in den Rückhalteraum eines Laufwasserkraftwerks (VERBUND Austrian Hydropower 2004) oder in gewässerbegleitende Auen oder Bewässerungssysteme geleitet werden (Zolezzi 2012).

4.2.3 **Morphologische Aufwertungsmassnahmen**

Mit morphologischen Aufwertungen der Schwallstrecke können einige Auswirkungen von Schwall/Sunk etwas gedämpft werden. Durch die grössere Gewässerbite, die Bildung von Gewässerbereichen mit verlangsamter Strömung und die Anbindung von Seitengewässern, wie sie in den meisten Revitalisierungen angestrebt werden, kann neben einer Verbesserung der Habitatverfügbarkeit für Gewässerorganismen auch die Schwallwelle verzögert und der maximale Schwallabfluss sowie die Pegeländerungsraten reduziert werden. Durch die vergrösserte Gewässerbite wird jedoch auch die Wasserwechselzone vergrössert. In der Folge müssen die Tiere beim Abflussrückgang eine weitaus grössere Strecke zurücklegen, um der zurückweichenden Uferlinie folgen zu können, wodurch sich die Gefahr des Stran-

dens erhöht. In Schwallstrecken, die nicht aufgeweitet werden können, wurden bauliche Massnahmen erforscht, die zum Ziel hatten, die Uferbereiche mit Ausbuchtungen aufzuraufen (Meile 2008, Ribí 2012). In physikalischen Modellen bewirkten diese Massnahmen neben einer gewissen Dämpfung des Schwalls auch Rückzugsmöglichkeiten mit beruhigter Strömung für Fische, in denen sie während den Schwalldurchgängen ausweichen können. Dabei ist aber zu beachten, dass solche Massnahmen so gebaut werden, dass die Gefahr des Blockierens nicht erhöht wird.

Die positiven Auswirkungen von morphologischen Aufwertungsmassnahmen auf die Habitatverfügbarkeit und die Attraktivität als Erholungsraum für Besucher dürften die negativen Auswirkungen durch Stranden in den meisten Fällen deutlich überwiegen. Aus diesen Gründen ist der Einbezug solcher Massnahmen in die Sanierungsplanung trotz ihrer beschränkten Wirkung auf die Reduktion von Schwall/Sunk notwendig.

4.3 Betriebliche Sanierungsmassnahmen

Eine Reduktion des pro Zeiteinheit eingeleiteten Wassers kann auch erreicht werden, wenn die Menge an turbinierem Wasser durch betriebliche Einschränkungen entsprechend geregelt wird. Solche betriebliche Massnahmen wirken sich jedoch in den meisten Fällen negativ auf die Flexibilität der Stromproduktion aus. Gewässerökologisch günstigere Abflussbedingungen können erreicht werden, indem die maximale Menge turbinierem Wassers beschränkt wird, dadurch werden die Schwallspitzen verringert. Zusätzlich kann der Sunkabfluss optimiert werden, in dem die minimale Dotiermenge (d. h. die Restwassermenge) erhöht wird. Ausserdem können die Abflussänderungsraten durch langsames an- und zurückfahren der Turbinen verringert werden (Abb. 3.1).

In einer Kraftwerkskaskade bieten sich eine Reihe weiterer Steuerungs- und Optimierungsmöglichkeiten zur Reduktion von Schwall/Sunk. Die Produktion und somit die Füllung der verschiedenen Speicher kann aufeinander abgestimmt werden, sodass unterhalb liegende Speicher genug verbleibende Speicherkapazität aufweisen, um den Schwall aus den oberhalb liegenden Zentralen aufzufangen (z. B. Kraftwerkskaskade Reuss, s. Kapitel 9.2.4). So würde nicht die kumulierte Menge an turbinierem Wasser gleichzeitig in das Gewässer abgegeben, sondern zeitlich verschoben und somit mit geringerem Schwall/Sunk-Verhältnis (Moog 1993). Ein ähnlicher Effekt kann erreicht werden, wenn das flussabwärts liegende Kraftwerk während der Sunkphase des oberhalb liegenden einleitet und so dessen Restwassermenge aufbessert und das Schwall/Sunk-Verhältnis reduziert. Antizyklisches Einleiten des turbinierem Wassers kann auch aus der Fliessdauer zwischen zwei Einleitungen resultieren. Auch wenn die Kraftwerke gleichzeitig produzieren, kann bei geeigneter Fliessdauer der Schwall des flussabwärts liegenden Kraftwerks während der Sunkphase des flussaufwärts liegenden Kraftwerks eingeleitet werden und so den Sunkabfluss aufbessern. Wie bereits erwähnt, muss die kombinierte Wirkung mehrerer Kraftwerke auf ein Fliessgewässer bei der übergeordneten Planung der Sanierungsmassnahmen berücksichtigt werden.

Betriebliche Massnahmen (aber auch die Steuerung von Beruhigungsbecken) bieten die Möglichkeit, die Schwall/Sunk-Dämpfung der Empfindlichkeit der Fliessgewässerorganismen anzupassen, welche sich zwischen Arten und Lebensstadien und somit im Jahresverlauf unterscheidet. So sind zum Beispiel junge Larvenstadien der Makroinvertebraten und der Laich sowie das Brütlingstadium der Fische am empfindlichsten auf Sedimentumlagerungen oder Verdriftung, weil sie sich im oder direkt auf dem Substrat aufhalten und letztere ausserdem schwache Schwimmer sind. Mit gewässerökologischen Untersuchungen kann die Artenzusammensetzung und Populationsstruktur der Organismen in der Schwallstrecke

abgeschätzt und die Festlegung von Schwall/Sunk-Grenzwerten unterstützt werden.

Kapitel 5

Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen

Für die erste Planungsphase der Schwall/Sunk-Sanierung ist primär eine Analyse des Ist-Zustandes der beeinträchtigten Gewässer notwendig (Baumann et al. 2012). In der zweiten Phase sollen die Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen abgeschätzt und die geeignete Variante ausgearbeitet werden. Zu diesem Zweck müssen diese Auswirkungen auf die Gewässerökologie prognostiziert werden, um unterschiedliche Varianten vergleichen und dimensionieren zu können. Für diese Prognostizierung stehen unterschiedliche Ansätze zur Verfügung mit ihren jeweiligen Stärken und Einschränkungen. In diesem Kapitel werden die Prognostizierungsansätze beschrieben und die Anwendungsmöglichkeiten erläutert, die in den ausgewerteten Sanierungs- oder Forschungsprojekten am häufigsten angewendet wurden.

5.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die Gewässerökologie ist ein wichtiger Schritt der Sanierungsplanung. Sie ist die Grundlage für die Entscheidung über Art und Dimensionierung der Massnahme. Vor allem bauliche Massnahmen lassen sich nach der Umsetzung nur unter grossem Aufwand anpassen oder ergänzen, falls die Ziele der Sanierung nicht erreicht wurden. Da durch die Schweizerische Gesetzgebung primär bauliche Massnahmen vorgesehen sind (Art. 39a GSchG), nimmt dementsprechend die Bedeutung einer verlässlichen Prognostizierung zu.

Für die Prognostizierung ist eine Definition des Zielzustandes der Gewässerökologie der Schwallstrecke notwendig, an der sich die Schwall/Sunk-Sanierung orientieren soll. Dieser Zustand kann entweder aus Referenzstrecken in unbelasteten Flüssen mit ähnlicher Charakteristik (z. B. Hydrologie, Geologie, Landnutzung, Zoogeographie, etc.) oder aus Informationen über den Zustand der Schwallstrecke vor Inbetriebnahme der Speicherkraftwerke hergeleitet werden (Peter & Scheidegger 2012). Mit der Prognostizierung kann dann abgeschätzt werden, mit welcher Sanierungsmassnahme dieser Zustand am Effizientesten erreicht werden kann.

5.2 Schwallversuche

Während Schwallversuchen wird der Abfluss in der Schwallstrecke durch eine Anpassung der eingeleiteten Wassermenge (Dotierung) so variiert, dass er Schwallereignisse mit unterschiedlicher Ausprägung (Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten, maximaler und minimaler Abfluss etc.; Abb. 3.1) abbildet. Während diesen simulierten Schwallereignissen können die Auswirkungen auf die Gewässerökologie unter aktuellen und zukünftigen (sanierten) Abflussbedingungen erfasst werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse widerspiegeln realistische Bedingungen in der Schwallstrecke und ermöglichen darum sehr verlässliche Aussagen über kurzfristige Effekte von Schwall/Sunk (s. Kapitel 3). Längerfristige Auswirkungen (z. B. Veränderung der Biomasse oder Artenvielfalt) können zwar aus Schwallversuchen mit fundierten Kenntnissen der Gewässerökologie abgeleitet werden, jedoch nicht direkt erhoben werden. Auch können Schwallversuche nur die Auswirkungen von Schwall/Sunk bei der aktuellen Morphologie beschreiben, jedoch nicht die veränderten Bedingungen aufgrund von morphologischen Aufwertungen in der Schwallstrecke.

Erfahrungen mit Schwallversuchen wurden in mehreren Schwallstrecken gemacht, so etwa während den Untersuchungen im Rahmen der Ausbauplanungen der Kraftwerke Oberhasli, Amsteg und Linth-Limmern (s. Kapitel 9.2). Da Schwallversuche in den Betrieb der Kraftwerke eingreifen, können sie während der Dauer der Schwallversuche grosse Einbussen der Stromproduktion und deren Flexibilität zur Folge haben. Die hohe Qualität der gewonnenen Daten und deren Bedeutung für die Planung der Sanierungsmassnahmen dürften diese Einbussen jedoch in den meisten Fällen rechtfertigen.

5.3 Physikalische Modelle

Mit physikalischen Modellen von baulichen Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen oder der Schwallstrecke (z. B. Versuchsrinnen) können Untersuchungen der Massnahmen auf die Abflussbedingungen und einige Aspekte der Gewässerökologie untersucht werden (Schweizer et al. 2008). Diese Modelle können mit typischem Substrat, mit Flusswasser und -organismen besetzt und der Abfluss (respektive die eingeleitete Wassermenge) so variiert werden, dass er den Schwallereignissen und der Auswirkung von Sanierungsmassnahmen entspricht. Dann können die meisten abiotischen und biotischen Eigenschaften der modellierten Schwallstrecke gemessen und mit Messungen aus den realen Schwallstrecken verglichen werden.

Physikalische Modelle eignen sich für einfache Untersuchungen der Auswirkungen von Schwall/Sunk und der Sanierungsmassnahmen. Die Übertragung der Resultate auf die Bedingungen in der Schwallstrecke ist jedoch nicht ohne Einschränkungen möglich, da sich nicht alle Ökosystemelemente und -prozesse im Modellmassstab realistisch abbilden lassen (z. B. Sedimentumlagerungen, Morphologie, Habitatnutzung). Die Universität Trento (Carrolli et al. 2012), die Universität für Bodenkultur, Wien (BOKU 2011) und die Universität von Davis, Kalifornien (Cocherell et al. 2011) betreiben Installationen mit Versuchsrinnen zur Erforschung von Schwall/Sunk-Effekten auf Fliessgewässerorganismen, die zum Teil schon erste Resultate geliefert haben.

5.4 Numerische Modelle

Hydraulische Modelle ermöglichen die Abschätzung der hydraulischen Bedingungen (Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe, Sedimenttransport, etc.) für unterschiedliche Abfluss-

bedingungen und eignen sich deshalb insbesondere für die Prognostizierung der direkten Auswirkungen von Schwall/Sunk und von Sanierungsmassnahmen auf die Schwallstrecke (Rousselot et al. 2012). Allerdings ist die Erstellung eines quantitativ verlässlichen Modells, das über eine hohe räumliche Auflösung verfügt, mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Die Grundlage für die Erstellung und Kalibrierung der Modelle ist eine Erfassung der Gewässersohle und der Wasserspiegeländerungen sowie der relevanten Prozesse (Sedimentation, Resuspension, Geschiebetransport, etc.) bei unterschiedlichen Abflüssen (inklusive den maximalen und minimalen Abflüssen). Es sind also in jedem Fall lokale Erhebungen notwendig.

Numerische Modelle unterscheiden sich primär nach der Genauigkeit der Beschreibung der räumlichen Bedingungen und der gemessenen Ökosystemeigenschaften. Eindimensionale Modelle beschränken sich darauf, die hydraulischen Bedingungen an Querprofilen des Flusses zu beschreiben, ohne Unterscheidung der Bedingungen in der lateralen Dimension (Abb. 5.1). Sogenannte 1.5-dimensionale Modelle erlauben unterschiedliche Werte von einigen Parametern auf demselben Querprofil, z. B. der Fließgeschwindigkeit. Die Berechnung der Bedingungen durch zweidimensionale Modelle (z. B. Hydro_As-2D, BASEMENT) ist hingegen nicht an Querprofile gebunden, sondern erfolgt für Rasterelemente der benetzten Fläche.

Der Modellierungsaufwand (aber auch die Genauigkeit der möglichen Aussagen) für eine bestimmte Fließstrecke hängt von der gewählten Anzahl von Querprofilen, respektive von Rasterelementen ab und sollte sich ebenso wie die Wahl der Modelltypen (1D, 1.5D, 2D oder 3D) an der morphologischen Vielfalt des Gewässerabschnittes orientieren. Dabei be-

stimmt die Qualität der Datengrundlage – also der Erhebungen in der Schwallstrecke – die Genauigkeit der Voraussagen des Modells. Kanalisierte Abschnitte und grobskalige Prozesse können in vielen Fällen mit eindimensionalen Modellen ausreichend beschrieben werden. Für Abschnitte mit vielfältiger Morphologie und für feinskalige Prozesse sind zweidimensionale Modelle notwendig, da sonst die kleinräumigen Unterschiede der Parameter (z. B. in Uferzonen, Strömungsübergängen) nicht erfasst werden können (s. auch Baumann et al. 2012, Rousselot et al. 2012). Dreidimensionale Modelle eignen sich für Situationen in denen vertikale Unterschiede der Parameter (z. B. Fließgeschwindigkeit) oder vertikale Strömungen relevant sind (Shen & Diplas 2010). Für Schwallstrecken mit Abschnitten, die sich bezüglich ihrer morphologischen Vielfalt deutlich unterscheiden (z. B. Alpenrhein) könnten ein- und zweidimensionale Modelle auch kombiniert werden (Rousselot et al. 2012).

Um die modellierten abiotischen Eigenschaften eines Gewässers mit den biotischen Komponenten des Ökosystems zu verbinden, wurden sogenannte physikalische **Habitatmodelle** (z. B. Casimir, PHABSIM, MesoHABSIM) entwickelt. Die Verbindung geschieht vorwiegend über die Verwendung von Präferenzkurven, welche die Sensibilität oder Affinität einer Tierart oder Lebensstadium mit bestimmten abiotischen Parametern (z. B. Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe oder Substrat) in Beziehung setzt. Durch eine Standardisierung der mit Präferenzkurven ausgedrückten Eignung können verschiedene Parameter

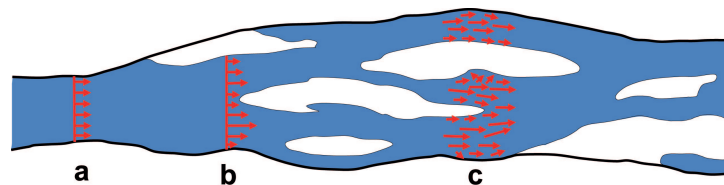


Abbildung 5.1: Beispielhafte Darstellung der Erfassung von abiotischen Parametern der Fließstrecke (hier der Fließgeschwindigkeit) mit verschiedenen Typen von hydraulischen Modellen (1D (a), 1.5D (b) und 2D (c)).

miteinander zu einer aggregierten Habitatseignung verrechnet werden. Der Aufwand für solche Berechnungen hängt neben der räumlichen Auflösung von der Anzahl der berücksichtigten hydraulischen Parameter und der Organismengruppen (Arten und Lebensstadien) ab.

Habitatmodelle wurden in den vergangenen Jahren auf unterschiedliche Weise für angewandte gewässerökologische Fragen verwendet. Erste Erfahrungen wurden auch in der Verwendung für die Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall/Sunk und Sanierungsmassnahmen gemacht (Zurverra & Bur 2009, Kopecki et al. 2012; IRKA 2012, s. auch Kapitel 9.2). Die Präferenzkurven können während den Erhebungen erstellt werden, indem die Biomasse oder Abundanz von Organismen zusammen mit den hydraulischen Parametern erfasst wird. Die für diesen Schritt notwendigen Messungen sind teilweise schwierig, z. B. weil der Abfluss während Schwallereignissen zu hoch ist, oder weil die Trübung die Elektrofischerei erschwert.

Die Verknüpfung mehrerer Präferenzkurven wird in diesen Modellen auf unterschiedliche Weisen durchgeführt: univariate Modelle, wie etwa PHABSIM, berücksichtigen die gegenseitige Beeinflussung der Wirkung von Habitatseigenschaften auf die Präferenzen nicht. Dies widerspiegelt die Gewässerökologie nur ungenügend, da Organismen Ansprüche an eine bestimmte Habitatseigenschaft haben, die vom Zustand anderer Habitatseigenschaften abhängen. Dieser Komplexität kann ansatzweise mit multivariaten Modellen (z. B. Casimir; Jorde et al. 2000) Rechnung getragen werden. Ausserdem kann Casimir auch diskrete Kategorien von Präferenzen berücksichtigen (z. B. Vorhandensein von Strukturtypen wie Totholz oder Wurzeln), sowie unklar abgegrenzte Habitatsansprüche abbilden (mit sogenannten Fuzzy-Regeln). Bei der Anwendung dieser Modelle muss man sich jedoch bewusst sein, dass sie nicht explizit für Gewässer mit Schwalleinfluss entwickelt wurden. Die Erfahrungen aus der Arbeit mit solchen Modellen in Schwallstrecken müssen daher sorgfältig und unter Berücksichtigung dieser Einschränkung ausgewertet werden. Hierfür eignen sich Untersuchungen in verschiedenen Schwallstrecken in der Schweiz und dem nahen Ausland, in denen das Casimir-Modell angewendet wurde (Zurverra & Bur 2009, IRKA 2012, Kopecki et al. 2012, s. auch Kapitel 9.2) und die für den vorliegenden Bericht verwendet wurden.

Der Zustand von Ökosystemen unter antropogenen Einflüssen (z. B. durch Schwall/Sunk) oder Umwelteinflüssen im Allgemeinen sowie die Fortsetzung dieser Einflüsse über interagierende Ökosystemkomponente (abiotische oder biotische Elemente und Prozesse) kann durch **mechanistische Modelle** beschrieben werden. Die ersten Modellansätze wurden schon vor Jahrzehnten erarbeitet und in der Folge weiterentwickelt, wiesen aber in den früheren Stadien einige Mängel auf, so berücksichtigten sie nur einzelne Organismengruppen oder Prozesse, wurden nicht mit Feldmessungen validiert, oder konnten Unsicherheiten in der Quantifizierung von Interaktionen nicht berücksichtigen (Schuwirth et al. 2008). In der Regel basieren solche Modelle auf Kausalnetzen (Abb. 3.3) mit welchen die Interaktionen zwischen Ökosystemkomponenten dargestellt werden. In den nächsten Schritten werden die Interaktionen mit Wertefunktionen quantifiziert und die Unsicherheiten, welche mit den Wertefunktionen dieser Interaktionen assoziiert sind, quantifiziert. Dadurch kann die Verlässlichkeit der Interpretation der Resultate und der daraus abgeleiteten Aussagen abgeschätzt werden.

Solche Modellansätze wurden schon zur Abschätzung von Veränderungen der Fisch- und Makrozoobenthosbiomasse in Schweizer Fliessgewässern und zur Identifikation der Ursachen angewendet (Borsuk et al. 2006, Schuwirth et al. 2008). Zur Zeit besteht aber noch wenig Erfahrung aus der Anwendung von mechanistischen Modellen, vor allem zur Beurteilung von Schwall/Sunk-Effekten. Die Anwendungsmöglichkeiten solcher Modelle

wird an der Eawag zur Zeit weiterentwickelt, auch für die Abschätzung der Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Makrozoobenthosdiversität (Schuwirth & Reichert 2012).

Kapitel 6

Indikatoren für die Erfassung und Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten

Für die Beschreibung und Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie sind Indikatoren notwendig. Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über Indikatoren, die in den ausgewerteten Projekten verwendet wurden und/oder vom BAFU für die erste Planungsphase und für die Erfassung des Ist-Zustandes einer Schwallstrecke vorgeschlagen wurden (Baumann et al. 2012). Nach einer Präsentation von allgemeinen Bemerkungen zu Indikatoren und deren Anwendung ist das Kapitel in abiotische und biotische Indikatoren unterteilt. Die entsprechende Beschreibung der Indikatoren umfasst auch eine Auflistung der jeweiligen Einflussfaktoren. Diese Auflistung ist eine Grundlage für die Identifikation von kausalen Zusammenhängen zwischen den Indikatoren (s. auch Abb. 3.3), welche insbesondere für die Auswahl von Indikatoren zur Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten wichtig war (s. Kapitel 7.1).

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Für die Beschreibung des gewässerökologischen Zustandes der Schwallstrecke und der Auswirkungen von Schwall/Sunk eignen sich abiotische und biotische Indikatoren. Biotische Indikatoren beschreiben den Zustand der Lebensgemeinschaft (z. B. Biomasse und Diversität der Tiere und Pflanzen; Tab. 6.1) und abiotische Indikatoren beschreiben deren Lebensbedingungen (z. B. Hydraulik oder der Zustand der Gewässersohle; Tab. 6.2).

Die zu erwartenden Auswirkungen von Schwall/Sunk und die Zusammensetzung der Artengemeinschaft sowie deren Sensitivität bestimmen die sinnvollen resp. notwendigen Indikatoren für die Untersuchung von Schwallstrecken. Damit die Aussagen solcher Untersuchungen aus verschiedenen Schwallstrecken vergleichbar sind, ist die Verwendung der gleichen Indikatoren zu empfehlen. Diese können dementsprechend in einem Indikatorenset zusammengefasst werden (Abb. 6.1).

Für die Erhebung des Ist-Zustandes werden die Indikatoren direkt in der Schwallstrecke erhoben (Baumann et al. 2012). Die Abschätzung der Auswirkung der Sanierungsmaßnahmen basiert hingegen auf einer Prognostizierung der Veränderungen der Gewässerökologie als Folge der Massnahmen. Dies sind unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Gewässerökologie mit unterschiedlichen Anforderungen an die Indikatoren und deren Anwendung.

So eignet sich ein Indikator, der sich gut im Fluss erheben lässt, nicht unbedingt zur Prognostizierung, wenn er von vielen Faktoren beeinflusst wird und diese sich nur schwer oder ungenau prognostizieren lassen (z. B. Diversität und Biomasse der Organismen; Abb. 3.3). Wenn möglich sollen solche Indikatoren durch Indikatoren ersetzt werden, die Rückschlüsse auf die ursprünglich angestrebten Indikatoren erlauben, aber einfacher zu prognostizieren sind (sogenannte Stellvertreter-Indikatoren).

Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze können sich die Indikatorensets zur Beschreibung des Ist-Zustandes und zur Prognostizierung eines zukünftigen Zustandes unterscheiden (Abb. 6.1). Damit aber die Abschätzung des zukünftigen Zustandes möglichst gut mit jenem des Ist-Zustandes vergleichbar ist, soll eine grösstmögliche Überschneidung dieser Indikatorensets angestrebt werden.

Nach der Umsetzung der Sanierungsmassnahme und nachdem die Gewässerökologie einen neuen Gleichgewichtszustand erreicht hat, soll sie im Rahmen von Erfolgskontrollen erneut untersucht werden und mit jenem vor der Umsetzung verglichen werden (Abb. 6.1; Baumann et al. 2012, Peter & Scheidegger 2012). Für die Erfolgskontrolle werden im Idealfall wiederum die gleichen Indikatoren wie für die Erfassung des Ist-Zustandes verwendet.

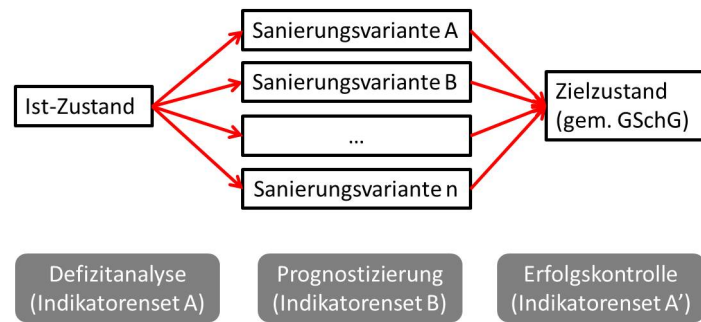


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Aufgaben der unterschiedlichen Indikatorensets. Für die Defizitanalyse und die Erfolgskontrolle sollten die gleichen oder ähnliche Indikatorensets verwendet werden, für die Prognostizierung sind z. T. andere Indikatoren notwendig.

6.2 Biotische Indikatoren

Biotische Indikatoren eignen sich zur Beschreibung des Zustands der Lebensgemeinschaften in der Schwallstrecke (Fische, Makrozoobenthos, Periphyton, etc). Dabei unterscheidet man zwischen kompositionellen, strukturellen und funktionellen Indikatoren (Peter & Scheidegger 2012). Kompositionelle Indikatoren erfassen die biologischen Elemente (z. B. Artenvielfalt, Biomasse, Abundanzen), strukturelle Indikatoren deren Organisation (z. B. Nahrungsnetz, Altersverteilung) und funktionelle Indikatoren beschreiben die biologischen Prozesse (z. B. Drift, Stranden, etc.). Da sich die Auswirkungen von Schwall/Sunk zwischen verschiedenen Organismen, Arten und Lebensstadien deutlich unterscheiden können (s. Kapitel 3), ist eine Vielzahl von Indikatoren notwendig, um die Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften vollständig zu beschreiben. Die biotischen Indikatoren werden durch abiotische und biotische Eigenschaften der Schwallstrecke beeinflusst, die ihrerseits mit anderen Indikatoren beschrieben werden können (hydromorphologische und ökologische Einflussgrössen; Tab. 6.1).

Tabelle 6.1: Beschreibung der biotischen Indikatoren zur Abschätzung von Schwall/Sunk-Effekten und ihre Beeinflussung durch hydromorphologische und gewässerökologische Einflussgrößen. Indikatoren, die für die Defizitanalyse des Ist-Zustandes vorgeschlagen wurden, sind mit dem entsprechenden Kürzel in Klammern gekennzeichnet (Baumann et al. 2012). MZB = Makrozoobenthos, MSK = Modulstufenkonzept (BUWAL 1998). Zur Verbesserung der Übersicht sind einzelne Zeilen grau hinterlegt.

Indikator	Definition	Hydromorphologische Einflussgrößen	Ökologische Einflussgrößen
MSK-Modul Fische (F1)	Artenvielfalt und -verteilung, Altersstruktur	potentiell alle	potentiell alle
Stranden von Fischen (F2)	Biomasse der gestrandeten und blockierten Fische	Änderung der benetzten Fläche pro Zeiteinheit, Abfluss, Morphologie, Substrat, Wassertemperatur, Tageszeit	Lebensstadium, Fischart (F1)
Laichareale der Fische (F3)	Quantifizierung der Laichareale mit geeigneten Bedingungen	Sohlenbewegung, Änderung der benetzten Fläche, Substrat, Morphologie, Tageszeit	Fischart (F1)
Reproduktion der Fischfauna (F4)	Anzahl der Juvenilen pro Flusskilometer	potentiell alle	Laichareale (F3), Stranden (F2), Drift, Bruterfolg
Fischereiche Produktivität (F5)	Produktivität eines Flussabschnittes ausgedrückt in Fischbiomasse	Temperatur, Morphologie, Abflussregime, Fließgeschwindigkeit, Substrat, Durchgängigkeit, Gefälle	MZB-Biomasse (B1), MZB-Arten (B2), Ufervegetation
Biomasse Makrozoobenthos (B1)	MZB-Biomasse pro Flusskilometer	potentiell alle	Stranden, Drift, Artenzusammensetzung (B2), Nahrungsverfügbarkeit
MSK-Modul Makrozoobenthos (B2)	Artenvielfalt und -verteilung, Altersstruktur	potentiell alle	potentiell alle
Längenzonation Makrozoobenthos (B3)	Repräsentation der MZB-Gemeinschaft gemäss der Flusszone	Fließgeschwindigkeit, Substrat, Abflussregime, Morphologie	Drift
ETP-Familien Makrozoobenthos (B4)	Anzahl Familien der Eintags-, Köcher- und Steinfliegen relativ zur gesamten Anzahl Familien	potentiell alle	Artenzusammensetzung (B2)
Verdriftung von Fischen und Makrozoobenthos	Biomasse in der Drift im Vergleich zur gesamten lokalen Biomasse	Sohlschubspannung und -änderung, Substrat, Turbulenz, Schwebstofffracht, Temperaturveränderung, Fließgeschwindigkeit und -änderung, Tageszeit	MZB-Biomasse (B1), Fischbiomasse, Lebensstadium, Aufwuchsalgenbiomasse
Stranden von Makrozoobenthos	Biomasse der gestrandeten und blockierten Tiere des MZB	Änderung der benetzten Fläche pro Zeiteinheit, Abfluss, Morphologie, Substrat, Wassertemperatur, Tageszeit	MZB-Biomasse und -Abundanz (B1), Lebensstadium, Tierart (B2)
Biomasse von Fischen	Fischbiomasse pro Flusskilometer	Potentiell alle	Drift, Stranden (F2), Laichareale (F3), Reproduktion (F4), Nahrungsverfügbarkeit (B1), Nahrungszusammensetzung
Reproduktionserfolg von Fischen	Überlebensrate des Fischlaich	Ständig benetzte Fläche, innere Kolmation (HI), Sohlenbewegung	Laichareale (F3)
Art und Verteilung der Ufervegetation	Verteilung und Zusammensetzung der Ufervegetation	Abflussregime, Morphologie, Substrat	Artenzusammensetzung Ufervegetation
Biomasse des Periphyton	Biomasse des Periphyton pro Flusskilometer	potentiell alle	Trockenfallen, MZB-Biomasse (B1), MZB-Arten (B2)

6.3 Abiotische Indikatoren

Die abiotischen Eigenschaften, welche die Verfügbarkeit und den Zustand von Habitaten in der Schwallstrecke mitbestimmen, können mit abiotischen Indikatoren beschrieben werden. Die abiotischen Indikatoren werden durch physikalische und chemische Prozesse in der Schwallstrecke beeinflusst, die ebenfalls mit Indikatoren beschrieben werden können (hydromorphologische Einflussgrößen; Tab. 6.2). Biotische Eigenschaften (z. B. Verhaltensweisen der Tiere) haben hingegen nur geringen und allenfalls sehr kleinräumigen Einfluss auf die abiotischen Indikatoren.

Tabelle 6.2: Beschreibung der abiotischen Indikatoren zur Abschätzung von Schwall/Sunk-Effekten und ihre Beeinflussung durch hydromorphologische Einflussgrößen. Indikatoren, die für die Defizitanalyse des Ist-Zustandes vorgeschlagen wurden, sind mit dem entsprechenden Kürzel in Klammern gekennzeichnet (Baumann et al. 2012).

Indikator	Definition	Hydromorphologische Einflussgrößen
Innere Kolmation (H1)	Ausmass der inneren Kolmation der Substratzwischenräume	Schwebstoffkonzentration, Sohlenbewegung, hydraulisches Potential, Morphologie
Mindestabfluss (A1)	Minimaler Abfluss bei Sunk	Restwassermenge
Wassertemperatur (Q1)	Kurzfristige Änderungen der Temperatur (Amplitude und Änderungsraten)	Temperatur des Restwassers und des turbinieren Wassers sowie deren relativen Anteile am Abfluss in der Schwallstrecke, hydrologische Vernetzung von Gewässerbereichen
Hydrologie	Schwall/Sunk-Parameter, durchschnittlicher Abfluss, Verteilung des Abflusses über das Jahr, Häufigkeit von Hochwassern	Natürlicher Abfluss, Betriebsweise der Kraftwerke
Sedimentregime	Sedimenteintrag und -transport, Re-suspension, Sedimentation, Aufreisen der Sohle	Korngrößenverteilung, Fließgeschwindigkeit, Sohlenschubspannung
Trübung	Kurzfristige Änderungen der Trübung (Amplitude und Änderungsraten)	Schwebstofffracht des Restwassers und des turbinieren Wasser sowie deren relativen Anteile am Abfluss in der Schwallstrecke, hydrologische Vernetzung von Gewässerbereichen
Chemische Wasserqualität	Chemische Zusammensetzung des Wassers	Chemische Zusammensetzung des Restwassers und des turbinieren Wasser sowie deren relativen Anteile am Abfluss in der Schwallstrecke, hydrologische Vernetzung von Gewässerbereichen
Veränderung der benetzten Fläche	Veränderung der benetzten Fläche der Schwallstrecke pro Zeiteinheit während Abflussänderungen	Zeitliche Veränderung der Betriebwasser- und Restwassermenge, Morphologie
Laterale Konnektivität	Anbindung von Seitengerinnen	Morphologie, maximaler und minimaler Abfluss
Eisproduktion	Masse und Verteilung des Oberflächeneises in der Schwallstrecke	Wassertemperatur, Fließgeschwindigkeit, Turbulenz

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Indikatoren zur Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Elemente der Flussökosysteme (Tab. 6.1, 6.2) wurden während dem Expertenworkshop bewertet (s. Kapitel 9.1). Diese Bewertung resultierte in einer Identifikation von Indikatoren, die stark von Schwall/Sunk beeinflusst sind und auch gut prognostizierbar sind (Abb. 7.1). Mit diesen Indikatoren wurde dann ein Indikatorenset zusammengestellt, mit dem die Effekte von Sanierungsmassnahmen auf alle relevanten Elemente von Flussökosystemen abgeschätzt werden können (Tab. 7.1).

Dieses Kapitel beschreibt das Indikatorenset zur Prognostizierung der Effekte von Sanierungsmassnahmen auf die Gewässerökologie und dessen Anwendung. Zusätzlich werden Empfehlungen zur Planung und Umsetzung von Sanierungsmassnahmen präsentiert, welche auf der Auswertung der Literatur, der Fallstudien und den Diskussionen mit Experten beruhen. Während diesen Arbeitsschritten wurden offene Fragen deutlich, die mit dem aktuellen Wissensstand nicht zufriedenstellend beantwortet werden können. Zur Beantwortung dieser Fragen sind Forschungsprojekte notwendig, die am Schluss dieses Kapitels vorgeschlagen und beschrieben werden.

7.1 Verwendung von Indikatoren zur Prognostizierung

Das vorgeschlagene Indikatorenset soll die Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die unterschiedlichen Phasen von Schwall/Sunk-Ereignissen und auf die verschiedenen Ökosystemkomponente (hydologische und hydraulische Bedingungen, Habitate, Organismengruppen) möglichst vollständig abbilden (Tab. 7.1). Für die Unterteilung von Schwaller-eignissen wurde dieselbe Struktur verwendet, wie zur Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk (s. Kapitel 3). Diese Struktur unterscheidet folgende Phasen: den Abflussanstieg (Schwall), den hohen Abfluss, die Abflussabnahme (Sunk), den tiefen Abfluss (Restwasser und Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet) und die Auswirkungen der hohen Variabilität des Abflusses (Tab. 7.1).

Zur Beschreibung der Ökosysteme und zur Abschätzung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen wurden die Indikatoren in mehrere abiotische und biotische Ökosystemkomponente unterteilt: Hydrologie, Sedimentregime, Trübung, Wassertemperatur, physikalische Habitatbedingungen, Zustand der Fischgemeinschaft, Zustand der Makrozoobenthosgemeinschaft und Zustand der Ufervegetation (Tab. 7.1). Diese Unterteilung

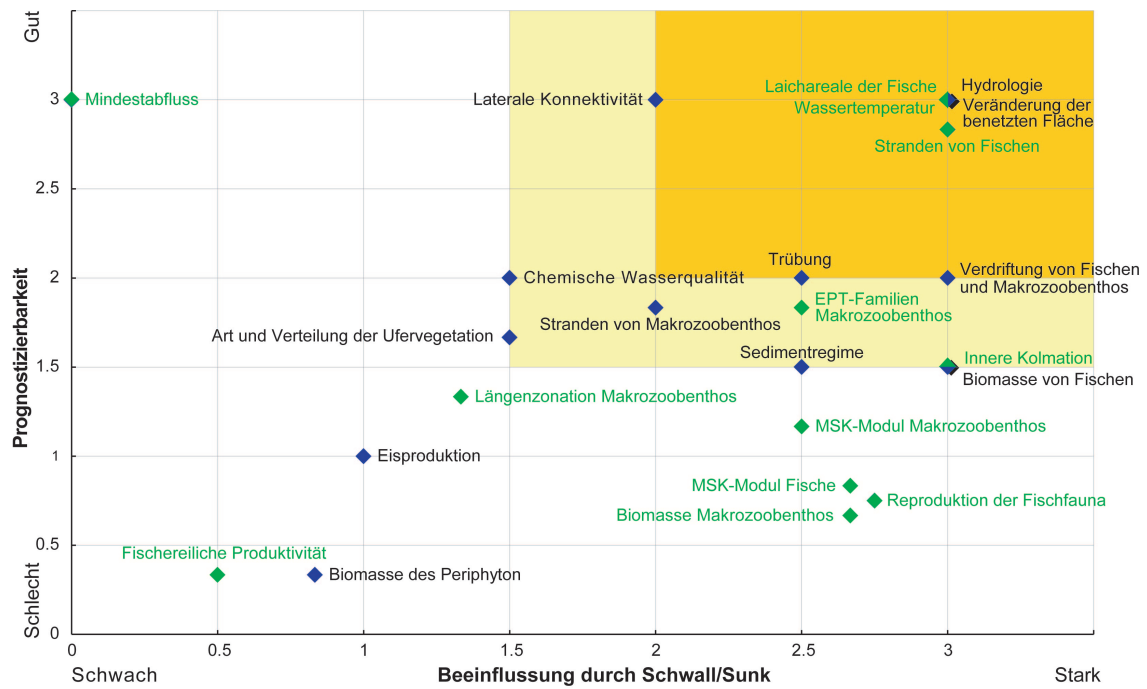


Abbildung 7.1: Bewertung der Schwall/Sunk-Indikatoren anhand ihrer Beeinflussung durch Schwall/Sunk und ihrer Prognostizierbarkeit auf einer Werteskala von 0 bis 3. Orange hinterlegte Indikatoren werden stark durch die jeweiligen Schwall/Sunk Eigenschaften beeinflusst und sind gut prognostizierbar. Hellgelb hinterlegte Indikatoren werden schwächer beeinflusst oder sind weniger gut prognostizierbar. Grün hervorgehobene Indikatoren wurden für die Erhebung des Ist-Zustandes vorgeschlagen (Baumann et al. 2012). Mit einer schwarzen Raute hinterlegte Rauten bedeuten mehrere Indikatoren mit derselben Bewertung.

Tabelle 7.1: Indikatorenset zur Beschreibung der Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die abiotischen und biotischen Ökosystemkomponente der Schwallstrecke. Orange hinterlegte Indikatoren werden stark durch die jeweiligen Schwall/Sunk Eigenschaften beeinflusst und sind gut prognostizierbar. Hellgelb hinterlegte Indikatoren werden schwächer beeinflusst oder sind weniger gut prognostizierbar. Siehe Kapitel 9.1 für eine ausführlichere Darstellung der Bewertung der Indikatoren.

	Tiefer Abfluss	Abflussanstieg	Hoher Abfluss	Abflussabnahme	Hohe Variabilität des Abflusses
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	Nicht relevant
Wassertemperatur	Wassertemperatur ^{c)}	Wassertemperatur	Wassertemperatur	Wassertemperatur	Nicht relevant
Habitat	Veränderung der benetzten Fläche ^{d)}	^{d)}	Veränderung der benetzten Fläche ^{d)}	^{d)}	Veränderung der benetzten Fläche
Fische	Trockenfallen von Laicharealen	Verdriftung von Fischen	Instabilität von Laicharealen	Stranden von Fischen	Biomasse/Abundanz von Fischen
Makrozoobenthos	Veränderung der benetzten Fläche	Verdriftung des Makrozoobenthos	Verdriftung Veränderung der benetzten Fläche	Stranden des Makrozoobenthos	EPT- Familien Makrozoobenthos
Ufervegetation	Veränderung der benetzten Fläche	Nicht relevant	Veränderung der benetzten Fläche Sedimentregime ^{b)}	Nicht relevant	Veränderung der benetzten Fläche Sedimentregime ^{b)}

^{a)} Hydrologische Indizes umfassen Q_{min} , Q_{max} , Q_{max}/Q_{min} , $Q_{max} - Q_{min}$, $\Delta Q_{Schwall}$, ΔQ_{Sunk} , resp. $\Delta cm/s_{Schwall}$, $\Delta cm/s_{Sunk}$; s. Kapitel 3.1

^{b)} Das Sedimentregime umfasst Prozesse wie Resuspension, Sedimentation, Sedimenttransport, Mobilisierung der Gewässersohle, s. Kapitel 3

^{c)} Als Referenzwerte für die anderen Schwallphasen notwendig

^{d)} Die Beschreibung dieser Ökosystemkomponenten könnte mit Habitatmodellierungen unterstützt werden

erlaubt eine umfassende Prognostizierung des Zustandes der wichtigsten Komponente des Ökosystems von Schwallstrecken und deren Lebensbedingungen.

Während die Indikatoren zur Beschreibung des Ist-Zustandes direkt in der Schwallstrecke erhoben werden können, müssen für die Prognostizierung des zukünftigen Zustandes übergeordnete Prozesse und Interaktionen zwischen Ökosystemkomponenten berücksichtigt werden. Die übergeordneten, grobskaligen Prozesse und Bedingungen bestimmen dabei den Rahmen, in dem sich die kleinskaligen Prozesse abspielen können, welche dann mit Hilfe der jeweiligen Indikatoren beurteilt werden können. Deswegen können zum Beispiel einzelne Indikatoren zur Beschreibung der Hydraulik (z. B. Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Wasserwechselzone, Substratstabilität) nicht ohne Kenntnis über die Hydrologie abgeschätzt werden, welche unter anderem die Niederschlagsbedingungen, den Kraftwerkbetrieb, die Gewässermorphologie sowie die Art der Sanierungsmassnahme umfassen.

Dasselbe gilt für Indikatoren, die den Zustand des Sediments beschreiben (z. B. Korngrößenverteilung, Schwebstofftransport, Sedimentumlagerungen, Kolmation) und ihrerseits von den übergeordneten Prozessen des Sedimentregimes (z. B. Menge, Korngröße und Dynamik des eingetragenen Sediments, Geschiebehalt im Einzugsgebiet, Hochwasserdynamik) kontrolliert werden. Ausserdem interagieren das Abfluss- und das Sedimentregime und bestimmen das Ausmass des bewegten Substrates und beeinflussen zusammen mit weiteren Indikatoren die Gewässermorphologie und die räumliche und zeitliche Verteilung der Habitate der Gewässerorganismen (Abb. 3.2) sowie deren Möglichkeiten zu migrieren und sich zwischen den Teilhabitaten zu bewegen.

Die **Hydrologie** (Tab. 7.1, Abb. 3.1) beschreibt neben den natürlichen Einflüssen

(durch Niederschläge, Schneeschmelze, etc.) die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf den Abfluss in der Schwallstrecke. Sie umfasst die Messgrößen Schwall/Sunk-Verhältnis, Abfluss- und Pegelamplitude zwischen minimalem und maximalem Abfluss eines Tages, Abfluss- und Pegeländerungsraten, Anzahl Schwallereignisse pro Tag, aber auch die Verteilung von Schwallereignissen über längere Zeiträume (Wochen und Monate). Die Hydrologie beeinflusst ihrerseits eine Vielzahl weiterer Indikatoren, wie den Zustand und die Stabilität von Habitaten oder das Ausmass der Wasserwechselzone und deren zeitliche Änderung, welche mit der Erhebung weiterer Indikatoren direkt beurteilt werden sollen. Wie aus obiger Definition deutlich wird, werden Abflusseigenschaften unmittelbar von Schwall/Sunk-Ereignissen beeinflusst und sind relativ gut vorhersagbar.

Die Vorhersage der Hydrologie unter zukünftigen Bedingungen (Sanierungsmassnahmen, Produktionsweise der Kraftwerke) kann auf einer Abschätzung der vorgesehenen Betriebsweise (z. B. verschiedene Szenarien der Bedingungen des Strommarktes und der gesetzlichen Regelungen) sowie den Rahmenbedingungen der Sanierungsmassnahmen (z. B. realisierbares Volumen von Beruhigungsbecken) und den Niederschlagsbedingungen basieren. Die ausgewerteten Fallstudien haben gezeigt, dass diese Informationen relativ gut abgeschätzt werden können, respektive für die längerfristige strategische Planung durch die Kraftwerke ohnehin erhoben werden. Unsicherheiten entstehen durch unvorhergesehene Entwicklungen des Strommarktes und der politischen Entscheidungen auf die Ausrichtung der Energieproduktion sowie der Auswirkungen des Klimawandels auf das Niederschlagsregime und die Vergletscherung.

Die Fortsetzung und Veränderung der Abflussbedingungen in der Schwallstrecke können dann mit numerischen Modellen abgeschätzt werden, wie sie auch für die Erhebung der aktuellen Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk (Defizitanalyse) vorgeschlagen wurden (Baumann et al. 2012). Dabei spielt die morphologische Heterogenität der Schwallstrecke eine grosse Rolle und bedarf in vielfältigen Streckenabschnitten Berechnungen mit zweidimensionalen hydraulischen Modellen (s. Kapitel 5.4).

Wie die Hydrologie umfasst die **Sedimentregime** eine Vielzahl von Prozessen, welche den Eintrag von Sedimenten in die Schwallstrecke sowie ihre Verteilung darin kontrollieren (Rückhalt von Feinsedimenten in den Speicherseen und deren Entleerung, Ab- und Umlagerung von Sediment in der Schwallstrecke, etc.) und die auch stark von der Betriebsweise der Kraftwerke und von Sanierungsmassnahmen abhängen. Die Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf das Sedimentregime können mit Kenntnis der Menge und Korngrösse des in die Schwallstrecke eingetragenen Sediments und den Eigenschaften der Schwallstrecke (z. B. morphologische Heterogenität) und des Zwischeneinzugsgebiets abgeschätzt werden. Diese Informationen könnten dann in zweidimensionalen hydraulischen Modellen verwendet werden, um die räumliche Verteilung der Prozesse des Sedimentregimes abzuschätzen. Zur Zeit sind die Erfahrungen aus der Anwendung zweidimensionaler Modelle zur kleinräumigen Beschreibung von Prozessen des Sedimentregimes noch sehr gering (s. aber IRKA 2012: Arbeitspaket 5).

Aufgrund der Komplexität der Prozesse des Sedimentregimes ist deren Prognostizierung nicht einfach. Stochastische Ereignisse wie Hochwasser üben einen äusserst starken Einfluss auf die räumliche Verteilung von Prozessen wie der Ablagerung oder Umschichtung von Sedimenten aus. Auch ist die Schubspannung, welche das Aufreissen der Gewässersole und den Geschiebetransport bestimmt, neben der Korngrößenverteilung auch von der Abpflasterung der Sohle abhängig. Die Stabilität, respektive das Aufreissen der Sohle ist seinerseits relevant für die Ausprägung der inneren Kolmation, die Resuspension und den Transport kleiner Sedimentfraktionen. Über den Einfluss von Schwall/Sunk auf diese

Prozesse ist noch sehr wenig bekannt, was deren Prognostizierung erschwert. Erste Erfahrungen mit hydraulischen Modellen, welche Kolmationsprozesse berücksichtigen konnten in der Fallstudie zur Schwall/Sunk-Sanierung im Alpenrhein (IRKA 2012: Arbeitspaket 4) gewonnen werden und könnten auf ähnliche Weise auf weitere Schwallstrecken angewendet werden. Zum Beispiel ist das numerische Modell BASEMENT der VAW der ETH Zürich für die Prognostizierung von Prozessen des Sedimentregimes geeignet und wurde schon in unterschiedlichen gewässerökologischen Projekten angewendet (Rousselot et al. 2012). Daher sollte es sich grundsätzlich auch für Schwallstrecken eignen. Solche numerische Simulationen sollten unbedingt mit Schwallversuchen verbunden werden, um die Ergebnisse des Modells zu bestätigen und zu verfeinern.

Die **Trübung** des Wassers in der Schwallstrecke wird stark durch den Bau und den Betrieb der Kraftwerke beeinflusst (s. Kapitel 3). Durch die Einleitung von Wasser aus den Speicherseen ist die Trübung vor allem in vergletscherten Einzugsgebieten in den Wintermonaten deutlich erhöht. Das Ausmass der Trübung ist dementsprechend primär abhängig vom Anteil turbinieren Wassers im Vergleich zur Restwassermenge und den Zuflüssen im Zwischeneinzugsgebiet. Deswegen ist sie während dem minimalen Abfluss nur relevant als Referenz für die anderen Schwallphasen (Tab. 7.1). Für die längerfristigen Auswirkungen von Schwall/Sunk ist die Trübung insofern relevant, als das sie durch die saisonale Umlagerung des Abflusses aufgrund der Speicherung, zum Teil vom Sommer in den Winter verlagert wird. Dieser Effekt dürfte sich jedoch zwischen den meisten Sanierungsmassnahmen (ausser einer vollständigen Ableitung des Schwalls) nicht unterscheiden und wird daher in unseren Empfehlungen nicht weiter berücksichtigt.

Die Datengrundlagen zur Abschätzung des Eintrags von Schwebstoffen aus den Speicherseen sind in der Regel bekannt oder können mit relativ geringem Aufwand erhoben oder geschätzt werden. Neben dem Eintrag aus den Speicherseen wird die Trübung durch die Aufwirbelung und den Transport von Feinsedimenten von der Gewässersohle erhöht. Diese Prozesse müssen in die Prognostizierung der Trübung miteinbezogen werden, was mit hydraulischen Modellen geschehen kann. Aus diesen Gründen ist die Prognostizierung der Trübung in der Schwallstrecke relativ einfach.

Ähnlich wie die Trübung in der Schwallstrecke wird die **Wassertemperatur** primär durch die Eigenschaften des turbinieren Wassers und dessen Anteil am Abfluss in der Schwallstrecke bestimmt. Deswegen ist die Beschreibung der Auswirkungen des tiefen Abflusses primär als Referenz für die anderen Schwallphasen relevant (Tab. 7.1). Auch die längerfristigen Auswirkungen von Schwall/Sunk dürften sich vorwiegend auf die Effekte der saisonalen Umlagerung des Abflusses beschränken und von der Auswahl der Sanierungsmassnahme unabhängig sein. Die Wassertemperatur kann sich in langen Schwallstrecken und solchen mit heterogener Morphologie und starker lateraler Vernetzung auch nach der Einleitung des turbinieren Wassers verändern. Diese Prozesse sind wahrscheinlich im Vergleich zu Temperaturänderungen durch eingeleitetes Wasser in den meisten Fällen jedoch von geringer Bedeutung. Die Prognostizierung der Wassertemperatur ist mit Kenntnis über die Bau- und Betriebsweise möglich. Die weiteren notwendigen Daten (z. B. Temperatur des Restwassers und der Zuflüsse sowie die laterale Vernetzung und Aufenthaltszeit des Wassers) können mit relativ geringem Aufwand gemessen werden.

Unter **Habitaten** in Schwallstrecken versteht man die abiotischen Eigenschaften des Lebensraums von Fliessgewässerorganismen, die sich aus der Fliessgeschwindigkeit, der Wassertiefe, dem Zustand der Gewässersohle, der Wasserchemie, der Gewässermorphologie und Strukturen der Ufervegetation (z. B. Totholz, Wurzeln etc.) zusammensetzen. Diese Eigenschaften bestimmen die Möglichkeiten der Tiere zur dauerhaften Besiedlung der Schwall-

strecke und werden stark durch Schwall/Sunk beeinflusst. Während der Abflusszunahme steigen in der Regel die Wassertiefe und die Fliessgeschwindigkeit - der Zustand der Gewässersohle bleibt jedoch relativ konstant innerhalb von Grenzwerten, ab welchen die Mobilisierung, respektive die Ablagerung von Sedimentpartikeln einsetzt. Mit Habitatmodellen ist es möglich, die Auswirkungen dieser physikalischen Parameter auf die Eignung der Habitate für die in der Schwallstrecke vorherrschenden Organismen und ihrer Lebensstadien zu prognostizieren, sofern deren Präferenzen und Toleranzgrenzwerte bekannt sind oder in den jeweiligen Fällen erhoben werden können (s. Kapitel 5.4, IRKA 2012). Zusätzlich sollte die berechnete Habitatseignung mit Schwallversuchen validiert und ergänzt werden.

Die maximal zur Verfügung stehenden Habitate hängen von der Grösse der benetzten Fläche der Schwallstrecke ab, die ihrerseits durch Schwall/Sunk stark beeinflusst wird und durch die Fläche der Wasserwechselzone beschrieben werden kann, welche neben der Abflussamplitude von der morphologischen Vielfalt der Strecke abhängt. Während den Abflussänderungen können die Auswirkungen der hydraulischen Bedingungen auf die Qualität und die räumliche Verteilung von Habitaten ebenfalls mit Modellen geschätzt werden. Dieser letzte Punkt ist vorwiegend für Tiere relevant, die zwischen Habitaten wechseln, um den Auswirkungen von Schwall/Sunk auszuweichen (z. B. Fische), hierfür müssen aber die jeweiligen Habitate erreichbar sein, was mit räumlich und zeitlich expliziten Habitatmodellen abgeschätzt werden kann.

Die verschiedenen Schwall/Sunk-Phasen und das beeinflusste Abflussregime haben vielfältige Auswirkungen auf die Qualität und die räumliche Verteilung der Habitate von **Fischen** und ihren Lebensstadien (s. Kapitel 3). Die adulten Tiere sind weniger anfällig auf die direkten Auswirkungen von Schwall/Sunk (z. B. Drift und Stranden), da sie sich rechtzeitig in geschützte Habitate zurückziehen können (wenn die Morphologie solche Refugien aufweist). Die Abflussextreme (minimaler und maximaler Abfluss) bestimmen primär die Verfügbarkeit von geeigneten Habitaten für die immobilen Lebensstadien der Fische (den Laich und teilweise die Brütlinge). Der minimale Abfluss limitiert die dauerhaft benetzte Fläche, während die Höhe des maximale Abfluss bestimmt ob das Substrat stabil bleibt. Die Benetzung und Stabilität des Substrats von Laichflächen können relativ gut mit hydraulischen Modellen und Schwallversuchen unter Berücksichtigung der lokalen Morphologie für zukünftige hydraulische Bedingungen abgeschätzt werden.

Die Auswirkungen der verschiedenen Schwall/Sunk-Phasen auf die Fischgemeinschaft sollte mit gewässerökologischen Untersuchungen während verschiedenen Abflusszenarien unterstützt und validiert werden (s. Kapitel 5.2). Die Prozesse welche durch ansteigenden oder abnehmenden Abfluss ausgelöst werden (Drift und Stranden), betreffen hingegen vorwiegend Lebensstadien mit schwachem Schwimmvermögen (Brütlinge und juvenile Tiere). Die Gefährdung von Fischen durch Drift sowie Stranden und Blockieren kann ebenfalls durch Modellrechnungen und Schwallversuche prognostiziert werden. Die Abschätzungen der längerfristigen Auswirkungen des Abflussregimes auf die Fischpopulation könnte auf prognostizierten Veränderungen der Fischbiomasse oder -abundanz beruhen, welche über die spezifische Habitatsqualität mit Habitatmodellierungen annähernd abgeschätzt werden können.

Durch ihre geringe Mobilität sind die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf Tiere des **Makrozoobenthos** vergleichbar mit jenen auf den Fischlaich oder die Brütlinge von Fischen. Die Abflussextreme (minimaler und maximaler Abfluss) wirken sich vorwiegend auf die potentielle Verfügbarkeit von Habitaten aus und kann durch das Ausmass der Wasserwechselzone abgeschätzt werden. Die Wasserwechselzone kann mit hydraulischen Modellen unter Berücksichtigung der aktuellen und zukünftigen Morphologie sowie mit Schwallversu-

chen abgeschätzt werden. Die Eignung dieser Habitats für die vorhandenen oder erwünschten Organismen kann dann mit Habitatmodellen oder ähnlichen Werkzeugen abgeschätzt werden.

Der rasch ansteigende und der hohe Abfluss während Schwallereignissen führt zu einer Verdriftung der Makroinvertebraten, hingegen verursacht eine starke Abnahme des Abflusses das Stranden. Durch diese Effekte wird die Habitatverfügbarkeit eingeschränkt. Diese Prozesse können mit Schwallversuchen oder in Versuchsrinnen untersucht oder mit Habitatmodellen simuliert werden. Für die längerfristigen Auswirkungen von Schwall/Sunk auf das Makrozoobenthos wird die Prognostizierung der Anzahl der EPT-Familien empfohlen, weil sich diese – im Gegensatz zur Diversität der Fischgemeinschaft – besser prognostizieren lässt, als ihre Biomasse oder Abundanz (Abb. 7.1). Dies kann mit Habitatmodellen geschehen, wovon schon erste Erfahrungen in mehreren Fallbeispielen (KWO, Alpenrhein; s. Kapitel 9.2) gemacht wurden.

Der Einfluss von Schwall/Sunk auf die **Ufervegetation** ist entscheidend von der Morphologie der Schwallstrecke abhängig und kann etwa in kanalisierten Strecken grossteils unbedeutend sein, da in den meisten Fällen die Ufer befestigt sind und die Wasserwechselzone auch unter starken Schwall/Sunk-Bedingungen sehr klein ist. In morphologisch vielfältigeren Fliessstrecken kann der Einfluss von Abflussschwankungen auf die Ausbreitung der Ufervegetation jedoch durch die Wasserwechselzone stark beeinflusst werden. Der tiefe Abfluss definiert die dauernd benetzte Gewässerfläche, welche die maximal mögliche Ausbreitung begrenzt, und der Maximalabfluss definiert über die Gewässerbreite, die Substratstabilität und die laterale Vernetzung des Gewässers die Habitatsbedingungen in der Wasserwechselzone. Die Übergänge zwischen den Abflussexremen sind hingegen von untergeordneter Bedeutung für die Ausbreitung und Zusammensetzung der Ufervegetation. Die Bedingungen in der Wasserwechselzone können mit hydraulischen Modellen unter Berücksichtigung der Morphologie sowie des Kraftwerksbetriebs und der geplanten Sanierungsmassnahme mit Schwallversuchen relativ gut abgeschätzt werden.

Die Resultate daraus können dann mit den Ansprüchen der vorhandenen oder erwarteten Arten der Ufervegetation in Habitatmodellen kombiniert werden. Die Erfahrungen aus der Anwendung von Habitatmodellen für die Prognostizierung der Ufervegetation sind noch sehr gering im Vergleich zu jenen für andere Organismengruppen (siehe aber Glenz 2005). Die enorme ökologische Bedeutung von morphologisch vielfältigen Gewässerabschnitten in grossen Fliessgewässern mit ihren vielfältigen Lebensräumen und Interaktion zwischen Habitats rechtfertigt eine im Vergleich zu ihrer räumlichen Verteilung überproportionale Berücksichtigung in der Planung der Sanierungsmassnahmen. Dies gilt ebenso für die Erforschung und Validierung von Präferenzkurven für die Arten der Ufervegetation für ihre Verwendung in Habitatmodellen.

7.2 Prognostizierung basierend auf dem beeinträchtigten Zustand

Eine Abschätzung der Veränderungen des Abfluss- und des Sedimentregimes ausgehend vom belasteten Zustand vor der Sanierung könnte die Prognostizierung vieler Indikatoren erleichtern, unter der Annahme, dass die übergeordneten Prozesse (Hydrologie, Hydraulik, Sedimentregime, Morphologie, etc.) konstant bleiben oder ihre Veränderungen gut abgeschätzt werden können. Übergeordnete Prozesse werden unter anderem durch grobskalige Einflüsse, wie veränderter Erosion und Niederschlagsbedingungen wie sie z. B. aufgrund

des Klimawandels zu erwarten sind, beeinflusst. Solche grobskaligen Einflüsse auf die Abflussbedingungen wurden in anderen Untersuchungen abgeschätzt (BAFU 2012) und zum Beispiel auch für die Berechnung der Eingangsgrößen für den an veränderte Niederschlags- und Temperaturbedingungen angepassten Kraftwerkbetrieb der KWO und die resultierenden Schwall/Sunk-Effekte in der Hasliaare (Bieri et al. 2011, Bieri 2012) und deren Fischpopulation verwendet (Dissertation von E. Person, Eawag, in Bearbeitung).

In die gleiche Richtung geht die Möglichkeit, Veränderungen des Zustandes der Gewässerökologie (v. a. Biomasse und Diversität der Fische und des Makrozoobenthos) nach der Sanierung basierend auf Erhebungen vor der Sanierung zu prognostizieren. Dadurch sind die potentiell vorhandenen Arten und ihre Abundanzen, respektive Biomassen bekannt und sie können unter Berücksichtigung ihrer Habitatsansprüche und der zu erwarteten Veränderungen der Habitateigenschaften durch die Sanierung prognostiziert werden (Abb. 3.3). Die Daten des vorangehenden Zustandes sind durch die Defizitanalyse verfügbar (Baumann et al. 2012).

7.3 Bedeutung des lokalen Kontextes

Die Auswertung der Fallstudien und Informationen von involvierten Experten hat deutlich aufgezeigt, dass für die Erhebungen von Schwall/Sunk-Effekten und zur Planung von Sanierungen die lokalen Bedingungen gut bekannt sein müssen. Die Betriebsweise der Kraftwerke und Einflüsse aus dem Einzugsgebiet (z. B. mit Auswirkungen auf die chemische Wasserqualität) aber auch die Eigenschaften der Schwallstrecke (z. B. Morphologie, laterale und longitudinale Vernetzung) und des betroffenen Ökosystems (vorhandene Organismengruppen und Arten) bestimmen die effektiven Auswirkungen von Schwall/Sunk im jeweiligen Fall (s. Kapitel 3). Ebenso werden die möglichen und sinnvollen Sanierungsvarianten durch sozioökonomische Rahmenbedingungen (z. B. Landnutzung im Umfeld der Einleitung und der Schwallstrecke) mitbestimmt.

Die Definition des erwünschten Zustands nach der Sanierung, respektive des ökologischen Potentials muss sich an den abiotischen und biotischen Eigenschaften der Schwallstrecke (z. B. Niederschlagsbedingungen oder vorkommende Arten) vor dem Bau der Kraftwerke orientieren. Das ökologische Potential kann aus dem möglichen zukünftigen Zustand des Gewässers, in dem die anthropogenen Einflüsse mit einem verhältnismässigen Aufwand beseitigt wurden, abgeleitet werden, zum Beispiel anhand des ökologischen Zustandes von Referenzgewässern (Baumann et al. 2012). Der für eine bestimmte Untersuchung der Sanierungsplanung (z. B. Erhebung des Ist-Zustandes) notwendige und gerechtfertigte Aufwand wird ebenfalls durch die Eigenschaften der Schwallstrecke bestimmt. Er hängt unter anderem von der morphologischen Vielfalt, den vorhandenen Arten und dem ökologischen Potential der Schwallstrecke ab. Daher kann sich der Untersuchungsaufwand stark zwischen verschiedenen Schwallstrecken aber auch zwischen Abschnitten innerhalb von Schwallstrecken unterscheiden (Baumann et al. 2012).

Die grosse Bedeutung des lokalen Kontextes hat zur Folge, dass sich Effekte von Schwall/Sunk nur sehr eingeschränkt generalisieren und zwischen verschiedenen Flusssystemen übertragen lassen. Daher sind grosse Investitionen in lokale Untersuchungen notwendig, der damit verbundene Aufwand ist aber durch die hohen Investitionskosten in Sanierungsmassnahmen und die sehr eingeschränkten nachträglichen Anpassungsmöglichkeiten von baulichen Massnahmen - falls die Sanierungsziele nicht erreicht werden - gerechtfertigt. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit Erfahrungen aus dem Ausland (z. B. Heggenes 2009, Hauer & Habersack 2012).

7.4 Bedeutung der Morphologie für die Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Morphologie der Schwallstrecke hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie (VAW 2006, Limnex 2007, Schweizer et al. 2009). Kanalisierte Abschnitte bieten den Organismen wenig Rückzugsmöglichkeiten während Schwallereignissen. Sie werden zusätzlich durch die mangelnde Verfügbarkeit von unterschiedlichen Teilhabitaten eingeschränkt. Beide Faktoren sind in morphologisch vielfältigen Abschnitten günstiger. In solchen bewegt sich jedoch die Uferlinie bei Abflussänderungen schneller, da die Uferneigung in den meisten Fällen geringer ist. Ohne Massnahmen zur Reduktion der Abflussrückgangsrates erhöht dieser Effekt die Gefahr des Strandens, weil die Tiere der Uferlinie nicht folgen können. Auch die Gefahr des Blockieren ist in solchen Abschnitten grösser, da sie in der Regel mehr Gewässerbereiche aufweisen, die nur bei hohem Abfluss mit dem Hauptgerinne verbunden sind und solche mit unterschiedlicher Sohlenneigung, die zu isolierten Flächen während dem Pegelrückgang führen (s. Kapitel 3). Insgesamt dürften in den allermeisten Fällen die positiven Effekte der morphologischen Vielfalt auf die Gewässerökologie aufgrund des grösseren Habitatangebots überwiegen (VAW 2006). Aus diesem Grund sind in den meisten Schwallstrecken auch morphologische Revitalisierungsmassnahmen notwendig, um die gewässerökologischen Bedingungen zu verbessern.

Am Fallbeispiel der Sanierung des Alpenrheins konnte die Bedeutung der Morphologie in einer Schwallstrecke und die Wechselwirkungen zwischen Schwall/Sunk, Morphologie und Habitatverfügbarkeit quantitativ aufgezeigt werden. Es wurde deutlich, dass auch bei weitreichender Schwall/Sunk-Sanierung die Habitatverfügbarkeit für Fische und Makroinvertebraten ungenügend ist, was auf das Fehlen von Habitaten mit den notwendigen morphologischen Eigenschaften zurückgeführt wurde (s. Kapitel 9.2.6). Diese Situation ist auch in anderen Fallstudien (Kraftwerke Oberhasli (KWO), Kraftwerk Amsteg (KWA), Kraftwerke Linth-Limmern (KLL); s. Kapitel 9.2) und wahrscheinlich auch in den meisten anderen Schwallstrecken gegeben, da diese ebenfalls weitgehend kanalisiert sind.

Die grosse Bedeutung unterschiedlicher Morphologien (auch kleinförmiger Strukturen) für die Auswirkungen von Schwall/Sunk bedeutet, dass die Habitatverfügbarkeit unter zukünftigen Abflussbedingungen in der gesamten Schwallstrecke erhoben werden müssten. Dies ist in den meisten Situationen jedoch mit einem unrealistisch hohen Aufwand verbunden. Um die zur Verfügung stehenden Mittel zur Prognostizierung möglichst effizient einzusetzen, können zum Beispiel in morphologisch homogenen Schwallstrecken anstelle der gesamten Strecke mehrere repräsentative Abschnitte untersucht werden. Deren Werte können dann unter Berücksichtigung der Prozesse des Zwischeneinzugsbebiets auf die gesamte Schwallstrecke extrapoliert werden. Entsprechend kann die Schwallstrecke auch in Abschnitte mit unterschiedlicher Morphologie eingeteilt und jeweils eine ausreichend grosse Anzahl repräsentativer Abschnitte beurteilt werden, welche dann innerhalb der morphologischen Kategorien extrapoliert werden. Für die Beurteilung der gesamten Schwallstrecke müssen dann die Ergebnisse aus den verschiedenen Kategorien entsprechend ihrer Anteile an der gesamten Schwallstrecke gewichtet werden.

7.5 Koordination mit anderen Revitalisierungsbemühungen

Andere Revitalisierungsbemühungen, zum Beispiel zur Sanierung des Geschiebetransports oder der morphologischen Vielfalt interagieren mit der Sanierung von Schwall/Sunk. Wie

in Kapitel 3 und an weiteren Stellen des Berichts deutlich wird, sind viele Schwall/Sunk-Effekte auf die Gewässerökologie unter anderem von der Morphologie, des Sedimentregimes aber auch der Restwassermenge abhängig. Bei geeigneter Berücksichtigung der Effekte dieser verschiedenen Sanierungen können sich Synergien für die Gewässerökologie ergeben, welche ausserdem den Sanierungsaufwand oder die Einschränkungen für die Nutzung des Wassers und der umliegenden Flächen reduzieren können. Wie anhand der Situation des Alpenrheins deutlich wird (s. Kapitel 9.2.6), ist diese Vorgehensweise am Beispiel der morphologischen Aufwertungen sogar notwendig, um überhaupt eine Verbesserung der Bedingungen für die Gewässerökologie zu erreichen. In diesen Fällen hätte auch eine vollständige Schwall/Sunk-Sanierung nicht zum angestrebten Zustand geführt und ein Teil dieses Aufwandes würde aus ökologischer Sicht besser in die morphologische Aufwertung investiert. Diese Gründe sprechen klar dafür, die unterschiedlichen Sanierungsvorhaben (Schwall/Sunk-Sanierung, Sanierung des Geschiebetransports, Sanierung der Fischgängigkeit und morphologische Revitalisierungen) aufeinander abzustimmen und koordiniert zu planen, wie es auch vom BAFU vorgeschlagen wird (Baumann et al. 2012).

7.6 Die Bedeutung von Erfolgskontrollen

Das Erreichen der beabsichtigten Auswirkungen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen und des Zustandes der Gewässerökologie muss mit Erfolgskontrollen überprüft werden (Art. 41g GSchV). Diese sind ein elementarer Bestandteil von Renaturierungsprojekten und sollten daher schon in der Projektplanung berücksichtigt werden (Kondolf 1995, Peter & Scheidegger 2012). Die Erhebungen der Erfolgskontrolle müssen mit jenen zur Beschreibung des vorgängigen Zustandes koordiniert werden, die gleichen Ökosystemkomponente untersuchen und wenn möglich auch die gleichen Methoden verwenden. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Werte vergleichbar sind. Ausserdem sollten Erfolgskontrollen erst durchgeführt werden, wenn sich der Zustand des Ökosystems wieder an die neuen Bedingungen angepasst hat. Dieser Zustand wird nach der Beseitigung von Eingriffen in die Ökosystembedingungen in der Grössenordnung von Schwall/Sunk, erst nach mehreren Jahren oder sogar Jahrzehnten erreicht.

Die Resultate der Erfolgskontrolle geben Aufschluss darüber, ob die Sanierungsmassnahmen erfolgreich waren und der gewünschte, respektive vorgeschriebene Zustand der Gewässerökologie erreicht wurde. Falls dieser Zustand nicht erreicht wurde, soll die Sanierung durch weitere Massnahmen vervollständigt werden, wodurch ein iterativer Prozess der Planung und -umsetzung entsteht, bis die Sanierungsziele erreicht wurden (Peter & Scheidegger 2012). Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen (aber auch die meisten anderen Sanierungs- und Revitalisierungsbemühungen) sind oft umfangreiche Projekte, die mit grossem finanziellem Aufwand verbunden sind und deren Möglichkeiten zur nachträglichen Anpassung sehr limitiert sind. Grosse Sanierungsprojekte sind ausserdem in den meisten Fällen effizienter als mehrere kleinere, wie sie nachträgliche Anpassungen bedingen würde. Eine Konsequenz aus dieser Erkenntnis ist, dass viel Aufwand in die Projektplanung, die vorgängigen Untersuchungen und die Prognostizierungen der Effekte der Sanierungsmassnahmen investiert werden sollte.

Die in diesem Projekt analysierten Sanierungsprojekte von Schwallstrecken in der Schweiz sind noch nicht bis zu den Erfolgskontrollen fortgeschritten (Tab. 2.1), sie sind aber in allen Fällen explizit geplant. Beispielhaft können die Untersuchungen an der Brenger Ach in Österreich angeführt werden, die vor und nach dem Bau des Kraftwerks Alberschwende mit Beruhigungsbecken durchgeführt wurden (Grasser et al. 1998). Dabei

wurden vor allem die Jungfische über einen längeren Zeitraum vor und nach dem Bau und in verschiedenen Gewässerabschnitten (oberhalb der Einleitung, zwischen Einleitung und Beruhigungsbecken und nach dem Beruhigungsbecken) untersucht. Es hat sich gezeigt, dass vor allem die Fliessgeschwindigkeiten bei Maximalabfluss während einem Schwall sowie die Temperaturunterschiede trotz Beruhigungsbecken noch zu hoch sind für die Jungfische, welche daher trotz Sanierungsmassnahme noch stark beeinträchtigt sind. Die Auswirkungen der Sanierungsmassnahme auf die Bedingungen für das Makrozoobenthos waren hingegen grösser, wodurch sich dessen Lebensbedingungen deutlich verbesserten (Grasser et al. 1998). Diese aufschlussreichen Resultate konnten nur dank gut vergleichbaren Untersuchungen vor und nach dem Bau des Kraftwerks gewonnen werden und waren notwendig für die Entwicklung der weiteren Sanierungsbemühungen.

7.7 Die Bedeutung von partizipativen Verfahren

Die Bedeutung des partizipativen Vorgehens bei der Ausgestaltung der Sanierungsplanung, der Definition der Ziele der Sanierung (z. B. gewässerökologischer Zielzustand; s. Tab. 2.1) und den dafür notwendigen Untersuchungen wurde in allen Fallstudien deutlich (s. Kapitel 9.2). In der Begleitgruppe der Sanierungsplanung sollten alle Interessengruppen vertreten sein, also neben den Kraftwerkbetreibern und Experten (Gewässerökologen, Hydrologen und Hydraulikern) auch Vertreter der kantonalen Behörden, welche die Sanierungsplanungen innerhalb des Kantons und mit dem BAFU koordinieren müssen, sowie der Umweltverbände, welche die Interessen des Natur- und Landschaftsschutzes vertreten.

Durch den möglichst frühen Einbezug dieser Interessengruppen kann zum Einen zusätzliche Expertise in den Planungsprozess integriert werden. Zum Anderen können durch die frühe Kompromisfindung Einsparungen der beteiligten Interessengruppen und somit substantielle Verzögerungen in Bewilligungsverfahren in den meisten Fällen verhindert werden. Beispielhaft kann der Begleitgruppenprozess für die Ausbauprojekte der KWO (KWO-plus) angeführt werden, der trotz schwieriger Vorgeschichte (langjährige Diskussionen und Verfahren über die Erhöhung der Grimselstaumauer) und sehr grossen Ausbauvorhaben, zu einem für alle Interessengruppen zufriedenstellenden Kompromis führte (Schweizer et al. 2012). Falls diese Ausbauvorhaben wie geplant umgesetzt werden, führen sie zu einem deutlich verbesserten ökologischen Zustand trotz grösserer Produktionsmenge und -flexibilität gegenüber der aktuellen Situation.

Schweizer et al. (2012) führen den Erfolg der Verhandlungen auf folgende Gründe zurück:

- Fundierte gewässerökologische Untersuchungen
- Transparente und objektive Ökobilanzierung
- Fokus auf möglichst grosse ökologische Aufwertung durch effiziente Massnahmen
- Einführung ökologischer Zielniveaus
- Einbezug aller Betroffenen mit grösstmöglicher Transparenz
- Offene Haltung und Verhandlungsbereitschaft aller Beteiligten.

Der Begleitgruppenprozess sollte nicht mit Beginn der Bauarbeiten abgeschlossen werden, sondern auch das Monitoring (inklusive Durchführung und Interpretation der Erfolgs-

kontrolle) und die Planung der allenfalls notwendigen Anpassungen der Sanierungsmassnahmen umfassen. Dadurch kann gewährleistet werden, dass der Zielzustand in einem für alle Betroffenen akzeptablen Ausmass erreicht wird.

7.8 Anwendung der Indikatoren in nicht watbaren Gewässern

Die meisten Schwallstrecken sind grössere Fliessgewässer, die während durchschnittlichen Abflussbedingungen nicht watbar sind. Dieser Umstand schränkt die Erhebung der für die Prognostizierung (aber auch für die Defizitanalyse; Baumann et al. 2012) vorgeschlagenen Indikatoren ein oder bedingt einen grösseren Untersuchungsaufwand. Die meisten der im Indikatorenset zur Prognostizierung vorgeschlagenen Indikatoren müssen nicht im Wasser erhoben werden (z. B. Ausprägung der Wasserwechselzone, Stranden, Trockenfallen von Laichflächen). Für andere Indikatoren können die Erhebungsmethoden angepasst werden. Zum Beispiel ist die Messung der Drift in tiefen Bereichen nicht mehr mit Driftnetzen möglich (Limnex 2006), da diese nicht installiert werden können. In solchen Fällen kann die Drift mit abgepumpten Wasserproben gemessen werden (Schweizer et al. 2010). Auf die gleiche Weise können auch die Wassertemperatur und Schwebstoffe gemessen werden.

Für die meisten anderen Indikatoren reicht es, wenn sie bei minimalem Abfluss erfasst werden, bei dem viele Schwallstrecken watbar sind. Dies gilt zum Beispiel für Erhebungen zur Zusammensetzung und Stabilität des Substrats und von Laichflächen, die mit Messungen vor und nach einem Schwallereignis unter Verwendung von markiertem Kies beurteilt werden können. Auch können die Kartierungen des Flussbettes für die Anwendung von hydraulischen Modellen und für Habitatmodelle sowie Probenahmen der Fliessgewässerorganismen bei minimalem Abfluss durchgeführt werden. Letzteres reicht aus für eine Beschreibung der vorhandenen Arten und Biomasse, die zusammen mit den Informationen über das Driften und Stranden (und anderen Indikatoren) dieser Tiere eine gute Abschätzung der Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie erlauben. Eine Einschränkung ergibt sich aus dieser Vorgehensweise aber für die Berechnung von Präferenzkurven für die Verwendung in Habitatmodellen, die dann nicht den ganzen Wertebereich der Wassertiefe und Fliessgeschwindigkeiten während Schwallereignissen abdecken. Die Präferenzkurven müssen daher aus Bedingungen mit tiefem Abfluss extrapoliert und mit Literaturwerten verglichen werden.

7.9 Vorschläge für Forschungsprojekte

Im Rahmen dieses Projekt wurden für die Planung von Sanierungsmassnahmen entscheidende Wissenslücken identifiziert und in Form von Vorschlägen für Forschungsprojekte formuliert. Dabei liegt der Fokus auf Forschungsfragen, welche die Anwendung des vorgeschlagenen Indikatorensets und die Prognostizierbarkeit von Indikatoren unterstützen. Der grösste Forschungsbedarf besteht bei jenen Indikatoren des Indikatorensets, deren Prognostizierbarkeit mit einem Wert unter 2 bewertet wurde (Tab. 7.1). Ausserdem muss die Anwendbarkeit dieses Indikatorensets in konkreten Sanierungsprojekten überprüft und allenfalls optimiert werden.

Die hier kurz umschriebenen Forschungsvorschläge sollen in einem nächsten Schritt weiterentwickelt und unter Einbezug von Experten und Vertretern des BAFU priorisiert werden. Diese Übersicht wird die Grundlage bieten für die Ausarbeitung von Forschungsanträgen. Aufgrund des interdisziplinären Hintergrundes der Forschungsprojekte ist es wichtig, dass die Anträge in Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Forschungsinstitutionen

erarbeitet werden. Das in diesem Projekt entwickelte Netzwerk von Experten könnte die Grundlage für diese Zusammenarbeit bieten. Sie müsste aber erweitert werden und z. B. auch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH einbeziehen.

Solche Forschungsprojekte würden von weit fortgeschrittenen Sanierungsprojekten profitieren, welche zu diesem Zweck von ausführlichen Untersuchungen begleitet werden sollten. Der Fokus und Umfang solcher Forschungsprojekte soll ein Wissensgewinn ermöglichen, der über den für die jeweilige Sanierung notwendigen hinausgeht und auch für andere Sanierungsprojekte relevant ist. Weit fortgeschrittene Sanierungsprojekte sollten ohne Verzögerungen vorangetrieben und begleitende Untersuchungen und Forschungsprojekte auch finanziell unterstützt werden. Die ausführlichen Arbeiten der KWO in der Hasliaare, die teilweise in Zusammenarbeit mit der Eawag und dem Labor für Wasserbau der ETH Lausanne durchgeführt wurden (s. Kapitel 9.2.1), können als Beispiel für koordinierte Untersuchungen dienen, welche einen allgemeinen Erkenntnisgewinn über Schwall/Sunk-Effekte und deren Prognostizierung bieten.

7.9.1 Sedimentregime

Aufgrund der ausgewerteten Untersuchungen wurde die Bedeutung des Sedimentregimes für die Ökosystemqualität aber auch seine vielfältige Beeinflussung durch Schwall/Sunk ersichtlich. Deshalb ist es notwendig, das Sedimentregime im Indikatorenset zur Planung von Sanierungsmassnahmen zu berücksichtigen. Allerdings wurde die Prognostizierbarkeit des Sedimentregimes als schwierig eingestuft (Tab. 7.1) und sollte mit Forschungsprojekten verbessert werden. Numerische Modellansätze zur Prognostizierung der meisten Prozesse des Sedimentregimes existieren bereits. Dies gilt für den Eintrag von Sediment in die Schwallstrecke aber auch für die meisten kleinräumigen Prozesse, die sich innerhalb der Schwallstrecke abspielen (z. B. Resuspension, Sedimentation und Sedimentumlagerungen). Für einige Prozesse müssten diese jedoch noch erarbeitet oder verbessert werden, zum Beispiel für den Einfluss von Schwall/Sunk auf die Kolmation und die Korngrößenverteilung. Forschungsprojekte sollen explizit das Verständnis der Prozesse des Sedimentregimes aus ökologischer Sicht verbessern, wie die Rolle des Sedimentregimes für die Verfügbarkeit von Laichplätzen, Substratzwischenräumen etc. Die Anwendung solcher Modelle und die zugrundeliegenden Modellparameter müssen ausserdem in Schwallstrecken noch explizit getestet werden.

Numerische Modelle zur Prognostizierung des Sedimentregimes könnten in einem Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit einem Kraftwerksbetreiber untersucht werden, wie das auch schon für die Prognostizierung der Hydrologie gemacht wurde (Bieri 2012). Dadurch könnte die Komplexität von Kraftwerkssystemen abgebildet werden und die Übertragung der Erkenntnisse auf konkrete Sanierungsprojekte gewährleistet werden. Die kleinräumigen Prozesse des Sedimentregimes unter den hydraulischen Bedingungen der Schwallstrecke könnten mit Schwallversuchen oder physikalische Modellen untersucht werden.

7.9.2 Stranden von Makrozoobenthos

Untersuchungen über das Strandens des Makrozoobenthos fehlen weitgehend im Gegensatz zu Untersuchungen mit Fischen (s. aber Perry & Perry 1986). Durch deutliche Unterschiede in der Körpergrösse, der Mobilität und den Verhaltensweisen können Erkenntnisse aus Untersuchungen mit Fischen aber nur sehr beschränkt auf das Makrozoobenthos übertragen

werden. Wichtige Fragestellungen sind zum Beispiel, welche Bedeutung Substratzwischenräume als Refugien in trockenfallenden Flächen haben und wie lange die Tiere des Makrozoobenthos darin überleben können. Solche Untersuchungen können mit Schwallversuchen oder physikalischen Modellen (z. B. Versuchsrinnen) durchgeführt werden.

7.9.3 Verdriftung von Fischen und Makrozoobenthos

Die ausgewerteten Untersuchungen haben die Bedeutung der Drift für die Bestände der Fische und des Makrozoobenthos unterstrichen. In Anbetracht dieser Bedeutung sollte die Kenntnis über die Einflussgrößen und ihre Prognostizierung verbessert werden. Insbesondere ist es für die Ausgestaltung der Sanierungsmassnahmen entscheidend, die Beziehung zwischen der Drift und hydraulischen Grenzwerten (z. B. Sohlenschubspannung, Reynold's-Zahl, Froude-Zahl) und ihren Änderungsraten zu quantifizieren. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften (z. B. Körperbau, Verhaltensweisen, etc.) der Organismen sind verschiedene hydraulische Grenzwerte zu erwarten; diese müssten daher spezifisch untersucht werden.

Solche Forschungsprojekte könnten in einer ersten Phase in Versuchsrinnen durchgeführt werden, müssten aber auch unter realen Bedingungen, d. h. mit Schwallversuchen verifiziert werden. Dieses Vorgehen würde Kollaborationen zwischen Forschungsinstituten und Kraftwerkbetreibern voraussetzen.

7.9.4 Biomasse/Abundanz von Fischen und Diversität des Makrozoobenthos

Die Prognostizierung der Biomasse respektive Abundanz der Fische und der Diversität des Makrozoobenthos in einer Schwallstrecke ist schwierig, weil sie durch viele Faktoren beeinflusst wird. Eine annähernde Schätzung könnte auf vergleichenden Studien zwischen Schwall- und Referenzstrecken beruhen, in denen Unterschiede dieser Indikatoren mit den jeweiligen Eigenschaften der Schwall/Sunk-Ereignisse und der Schwallstrecke (z. B. Morphologie) in Beziehung gesetzt werden. Die Defizitanalysen der ersten Planungsphase werden einen grossen Datensatz liefern, der voraussichtlich mit ähnlichen Methoden erhoben wurde und in einem Forschungsprojekt gezielt ausgewertet werden könnte. Neben einem allgemeinen Erkenntnisgewinn über die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Fische und das Makrozoobenthos könnten diese Daten auch für die Entwicklung von Präferenzkurven von Habitatmodellen für Schwallstrecken verwendet werden, in denen die biologischen Erhebungen nicht durchgeführt werden können.

7.9.5 Berücksichtigung der zeitlichen Komponente der Habitatverfügbarkeit

Die zeitliche Verfügbarkeit von Teilhabitaten während Schwallereignissen ist eine entscheidende Habitateigenschaft vor allem für mobile Tiere wie Fische. Für die verschiedenen Lebensstadien der Fische – aber auch der Makroinvertebraten – sind ausserdem deutlich unterschiedliche Teilhabitats wichtig. Trotz dieser Bedeutung wurde die Veränderung der Eignung und der Erreichbarkeit von Teilhabitaten während Schwallereignissen in Habitat-simulationsstudien in Schwallstrecken nicht einbezogen. In den ausgewerteten Beispielen (Alpenrhein, Hasliaare (s. Kapitel 9.2) und am Lech; Kopecki et al. 2012) wurden die Bedingungen während Extremwerten von Schwalldurchgängen berücksichtigt, aber nicht die zeitliche Veränderung der Eignung von Teilhabitaten und deren räumlichen Anordnung.

Mit Zeitreihenanalysen könnten diese zusätzlichen Informationen in die Habitatmodelle integriert werden. In einem Forschungsprojekt könnte die Anwendung dieser Methoden in Schwallstrecken untersucht und entwickelt werden. Zusätzlich müssten Grenzwerte für die Veränderung der Eignung und Erreichbarkeit von Teilhabitaten entwickelt werden, ab denen eine Schädigung eintritt.

Ein möglicher Ansatz, wie die Habitatseignung über längere Zeiträume quantifiziert und integriert werden könnte, bieten Zeitreihenanalysen unter Verwendung sogenannter Stress-Stunden (Parasiewicz et al. 2007). Dieser Wert entspricht der Summe an Stunden während denen ein Grenzwert einer relevanten Habitatseigenschaft überschritten wurde. Diese Grenzwerte dürften sich für verschiedene Tierarten und Lebensstadien aufgrund unterschiedlicher Reaktionszeiten und Mobilität stark unterscheiden.

7.9.6 Integration verschiedener räumlicher Skalen in Habitatmodellen

Die in den untersuchten Fallbeispielen angewendeten Habitatmodelle haben eine extrem hohe räumliche Auflösung und eignen sich zur Modellierung von relativ kurzen Gewässerabschnitten (einige hundert Meter). Die Werte aus den Simulationen von repräsentativen Abschnitten müssen dann auf die gesamte Schwallstrecke extrapoliert werden. Eine gröbere räumliche Auflösung bieten mesoskalige Habitatmodelle (z. B. MesoHABSIM; Parasiewicz 2001). Sie könnten sich für die Beschreibung der Habitatsbedingungen ganzer Schwallstrecken eignen und widerspiegeln daher eher die räumliche Dimension der Sanierungsplanungen. Für eine aussagekräftige Habitatsimulation müssten diese beiden Modelltypen kombiniert werden. Dabei sind aber die Anwendungsbereiche und die Verbindung der Modelle sorgfältig zu bestimmen. Erfahrungen der kombinierten Anwendung solcher Modelle – vor allem aus Schwallstrecken – fehlen zurzeit und könnten mit Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Kraftwerkbetreibern erarbeitet werden (s. aber Parasiewicz & Walker 2007).

7.9.7 Bedeutung der Morphologie für Schwall/Sunk-Effekte

Die ausgewerteten Untersuchungen belegen die grosse Bedeutung der Morphologie für die Auswirkungen von Schwall/Sunk und für die Habitatverfügbarkeit in der Schwallstrecke. Eine vielfältige Morphologie begünstigt in der Regel die Habitatverfügbarkeit der meisten Organismen und Lebensstadien in der Schwallstrecke in dem sie die meisten hydrologischen Effekte von Schwall/Sunk dämpfen und generell Refugien bieten kann. Allerdings sind auch negative Auswirkungen der Morphologie unter Schwall/Sunk-Einfluss zu erwarten (z. B. durch Stranden in flachen Uferzonen). In Anbetracht der Bedeutung der Morphologie und der Komplexität ihrer Wirkung ist der Kenntnisstand über die Beziehung zwischen Schwall/Sunk und der Morphologie noch ungenügend und zu wenig präzise. Er eignet sich daher nur eingeschränkt zur Planung von morphologischen Aufwertungsmaßnahmen und müsste mit Forschungsprojekten (z. B. mit physikalischen Modellen oder vergleichenden Untersuchungen in unterschiedlichen Gewässerabschnitten) erweitert werden. Diese Projekte müssten auch Unterschiede zwischen den Eigenschaften verschiedener Arten und Lebensstadien berücksichtigen.

7.9.8 Bedeutung der Morphologie für Sanierungsmassnahmen

Durch Interaktion der Morphologie mit den Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie muss sie auch für die Ausgestaltung der Sanierungsmassnahmen berücksichtigen.

sichtigt werden. Einige bauliche (z. B. Beruhigungsbecken) und die betrieblichen Sanierungsmassnahmen bieten vielfältige Steuerungsmöglichkeiten für die Rückgabe des turbinierten Wassers. Die optimale Ausgestaltung dieser Sanierungsmassnahmen hängt stark von der Morphologie der jeweiligen Schwallstrecke ab resp. der Verbreitung von Habitaten, die durch bestimmte Schwall/Sunk-Parameter beeinträchtigt werden. In Abhängigkeit der Verbreitung dieser Habitate können Sanierungsmassnahmen auf eine Minderung der Abflusszunahmeraten, und -abnahmeraten, des maximalen Abflusses, oder die Gestaltung eines Vorschwalls etc. abzielen (s. auch Kapitel 9.2).

Erfahrungen zur optimalen Ausgestaltung von Sanierungsmassnahmen müssen unter Berücksichtigung der jeweiligen Morphologie gezielt ausgewertet werden. Hierfür sind umgesetzte Sanierungsprojekte notwendig, deren Erfolgskontrolle und Beurteilung der allfälligen Anpassungen von Forschungsprojekten begleitet werden sollen. Zum jetzigen Zeitpunkt erscheinen die Sanierungen der Kraftwerke Linth-Limmern und Amsteg am geeignetsten für solche Projekte, da sie gewisse nachträgliche Anpassungsmöglichkeiten aufweisen und schon weit fortgeschritten sind (s. Kapitel 9.2.4 und 9.2.2).

7.9.9 Synthese von Forschungsprojekten

Die Erkenntnisse aus den individuellen Forschungsprojekten sollten fortlaufend übergreifend ausgewertet werden. Dadurch könnten konkrete Empfehlungen für die Auswahl und Planung von Sanierungsmassnahmen erarbeitet und kommuniziert werden. Dieser Schritt ist entscheidend für den Wissenstransfer von den einzelnen detaillierten Forschungsprojekten in die Praxis.

Dieses Forschungsprojekt würde ausserdem dazu beitragen, die Anwendung der Indikatoren zur Prognostizierung (Tab. 7.1) und das vorgeschlagene Indikatorenset zu optimieren. Zum Beispiel könnten durch die Erkenntnisse aus gezielten Untersuchungen Wertefunktionen der Indikatoren erstellt werden, welche die Bewertung der Resultate der Indikatoren unterstützen würden. Basierend auf diesen Bewertungen könnten dann die Resultate der einzelnen Indikatoren zu einem Gesamtergebnis über den gewässerökologischen Zustand der Schwallstrecke unter verschiedenen Szenarien (z. B. Sanierungsmassnahmen) aggregiert werden.

Kapitel 8

Literaturverzeichnis

- Anselmetti, F., R. Bühler, D. Finger, S. Girardclos, A. Lancini, C. Rellstab & M. Sturm (2007). Effects of Alpine hydropower dams on particle transport and lacustrine sedimentation. *Aquatic Sciences* 69.
- AquaPlus (2009). Kraftwerk am Ijentalerbach, Nesslau. Erneuerung und Erweiterung der bestehenden Wasserfassung und des Stauweihers. Gewässer- und fischökologische Begleituntersuchungen. Bericht z. H. Robert Fuchs AG, Schindellegi.
- AquaTerra (2007). Umweltverträglichkeitsbericht Kraftwerk Innertkirchen 1, Aufwertung 2. Etappe. Fachbereich Gewässerökologie. Bericht im Auftrag der KWO.
- ARGE Trübung Alpenrhein (2001). Trübung und Schwall im Alpenrhein. Synthesebericht im Auftrag der IRKA, Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Grundwasser- und Fischökologie, Vaduz.
- AXPO (2010). Zukunft Wasserkraft - Linthal 2015. Broschüre der Kraftwerke Linth Limmern.
- BAFU (2012). Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217.
- Baumann P., A. Kirchhofer & U. Schälchli (2012). Sanierung Schwall/Sunk - Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203.
- Baumann, P. & T. Meile (2004). Makrozoobenthos und Hydraulik in ausgewählten Querprofilen der Rhone. *Wasser Energie Luft* 96(11/12).
- Baumann, P. & I. Klaus (2003). Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes: Ergebnisse einer Literaturstudie. *Mitteilungen zur Fischerei*, Nr. 75. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Baumann, P. & U. Schälchli (2002). Trübung und Schwall im Alpenrhein. *Wasser Energie Luft* 94 (11/12).
- Becker, C. D., D. H. Fickeisen & J. C. Montgomery (1982). Effects of dewatering on chinook salmon redds: tolerance of four development phases to daily dewaterings. *Transactions of the American Fisheries Society* 111.
- Bell, E., W. G. Duffy & T. D. Roelofs (2001). Fidelity and survival of juvenile coho salmon in response to a flood. *Transactions of the American Fisheries Society* 130 (3).
- Berg, L. & T. G. Northcote (1985). Changes in territorial, gill-flaring, and feeding behavior in juvenile Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*) following short-term pulses of suspended sediment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42(8).

- BGF, Büro für Gewässer und Fischereifragen AG (2009). Erneuerung Kraftwerk Amsteg. Gewässerökologisch verträgliche Ausgestaltung des Schwallregimes. Schlussbericht zuhanden SBB.
- Bieri, M. P., A. J. Schleiss, F. Jordan, A. U. Fankhauser & M. H. Ursin (2011). Flood retention in alpine catchments equipped with complex hydropower schemes: A case study of the upper Aare catchment in Switzerland. In A. J. Schleiss and R. Boes (ed.) *Dams and Reservoirs under Changing Challenges*. London, Taylor & Francis Group.
- Bieri, M. P. (2012). Operation of complex hydropower schemes and its impact on the flow regime in the downstream river system under changing scenarios. Dissertation. EPFL, Lausanne.
- Bo, T., S. Fenoglio, G. Malacarne, M. Pessino & F. Sgariboldi (2007). Effects of clogging on stream macroinvertebrates: An experimental approach. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters* 37(2)
- BOKU (2011). Fließrinnen HyTEC. <http://hydropeaking.boku.ac.at/hytec.html>. 19. Juli. 2012.
- Bonalumi, M., F. S. Anselmetti, A. Wüest & M. Schmid (2012). Modelling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. *Water Resources Research* 48.
- Borsuk, M. E., P. Reichert, A. Peter, E. Schager & P. Burkhardt-Holm (2006). Assessing the decline of brown trout (*Salmon trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological modelling* 192.
- Bosco Imbert, J. & J. A. Perry (2000). Drift and benthic invertebrate responses to stepwise and abrupt increases in non-scouring flow. *Hydrobiologia* 436(1): 191-208.
- Bovee, K. D., B. L. Lamb, J. M. Bartholow, C. B. Stalnaker, J. Taylor & J. Henriksen (1998). Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. USGS/BRD-Information and Technology Report. USGS Biological Resources Division.
- Bruno, M. C., B. Maiolini, M. Carolli & L. Silveri (2009). Impact of hydropeaking on hyporheic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 45(03)
- BFE (2011). Schweizerische Energiestatistik 2010. Bundesamt für Energie, Bern.
- BUWAL (1998). Modul-Stufen-Konzept. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer in der Schweiz. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26.
- Bunn, S. E. & A. H. Arthington (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4).
- Carolli, M., M. C. Bruno, A. Siviglia & B. Maiolini (2012). Responses of benthic invertebrates to abrupt changes of temperature in flume simulations. *River Research and Applications* 28(6).
- Céréghino, R. and P. Lavandier (1998). Influence of hypolimnetic hydropeaking on the distribution and population dynamics of Ephemeroptera in a mountain stream. *Freshwater Biology* 40(2).
- Cocchiglia, L., S. Curran, E. Hannigan, P. Purcell, M. Kelly-Quinn (2012). Evaluation of the effects of fine sediment inputs from stream culverts on brown trout egg survival through field and laboratory assessments. *Inland Waters* 2(1).
- Cocherell, S. A., S. N. Chun, D. E. Cocherell, L. C. Thompson, A. P. Klimley & J. J. Cech jr. (2011). A lateral-displacement flume for fish behavior and stranding studies during simulated pulsed flows. *Environmental Biology of Fishes* 93(1).
- Crisp, D. T. (2000). Trout and salmon: ecology, conservation and rehabilitation. Blackwell Science, Oxford, UK.
- De Jalon, D. G., P. Sanchez & J. A. Camargo (1994). Downstream effects of a new hydropower impoundment on macrophyte, macroinvertebrate and fish communities. *Regulated Rivers: Research & Management* 9(4).

-
- Dole-Olivier, M. J., P. Marmonier & Befly J. L. (1997). Response of invertebrates to lotic disturbance: is the hyporheic zone a patchy refugium? *Freshwater Biology* 37(2).
- DRIFT (2011). Studio degli effetti delle variazioni di portata indotti dalla regimazione idroelettrica lungo il fiume Ticino - Rapporto conclusivo di sintesi. Dipartimento del Territorio. Cantone Ticino.
- 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.
- Elliott, J. M. (1994). *Quantitative ecology and the brown trout*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Europäische Kommission (2000). Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Fette, M. (2005). *Tracer Studies of River-Groundwater Interaction under Hydropeaking Conditions*. Dissertation. ETH, Zürich.
- Fette M., C. Weber, A. Peter & B. Wehrli (2007). Hydropower production and river rehabilitation: A case study on an alpine river. *Environmental Modeling and Assessment* 12(4).
- Fischnetz (2004). *Dem Fischrückgang auf der Spur*. Schlussbericht des Projekts Netzwerk Fischrückgang Schweiz - "Fischnetz".
- Flodmark, L. E. W., L. A. Vøllestad & T. Forseth (2004). Performance of juvenile brown trout exposed to fluctuating water level and temperature. *Journal of Fish Biology* 65(2).
- Flodmark, L. E. W., T. Forseth, J. H. L'Abée-Lund & L. A. Vøllestad (2006). Behaviour and growth of juvenile brown trout exposed to fluctuating flow. *Ecology of Freshwater Fish* 15(1).
- Franklin, P., M. Dunbar & Whitehead, P. (2008). Flow controls on lowland river macrophytes: A review. *Science of The Total Environment* 400(1-3).
- Frutiger, A. (2004). Ecological impacts of hydroelectric power production on the River Ticino. Part 1: Thermal effects. *Archiv für Hydrobiologie* 159(1).
- García, A., K. Jorde, E. Habit, D. Caamaño & O. Parra (2011). Downstream environmental effects of dam operations: Changes in habitat quality for native fish species. *River Research and Applications* 27(3).
- Grasser, U., P. Parasiewicz, G. A. Parthl & S. Schmutz (1998). *Limnologische Gesamtbeurteilung des KW Alberschwende - Synthesis*. BOKU - Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.
- Gayraud, S. & M. Philippe (2001). Does subsurface interstitial space influence general features and morphological traits of the benthic macroinvertebrate community in streams? *Archiv für Hydrobiologie* 151(4).
- Gersich, J. M. (1980). *Ecological resilience of benthic insects subjected to power peaking cycles in the Clearwater River, Idaho*. Dissertation. University of Idaho, Moscow ID, USA.
- Gibbins, C., D. Vericat & R. J. Batalla (2007). When is stream invertebrate drift catastrophic? The role of hydraulics and sediment transport in initiating drift during flood events. *Freshwater Biology* 52(12).
- Glenz, C. (2005). *Process-based, spatially-explicit modelling of riparian forest dynamics in central Europe – tool for decisionmaking in river restoration*. Dissertation. EPFL, Lausanne.
- Halleraker, J. H., S. J. Saltveit, A. Harby, J. V. Arnekleiv, H. P. Fjeldstad & B. Kohler (2003). Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. *River Research and Applications* 19(5-6).

- Harby, A., K. Alfredsen, J. V. Arnekleiv, L. E. W. Flodmark, J. H. Halleraker, S. Johansen & S. J. Saltveit (2004). Raske vannstandsendringer i elver - Virkninger på fisk, bunndyr, og begroing. Technischer Report Nr. A5932, SINTEF, Norwegen.
- Hauer, C. & H. Habersack (2012). SCHWALL_2012: Basic research for river type specific evaluation of hydropeaking impacts. Vortrag an der Fachtagung "International Workshop on Hydropeaking" der Alpenkonvention vom 19. Juni 2012 in Dübendorf.
- Heggenes, J. (2009). Hydropeaking in Norway: Economy and ecology. Vortrag an der Fachtagung "Schwall und Sunk im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie" der Wasser-Agenda 21 vom 9. März 2009 in Solothurn.
- Heller, P., E. F. R. Bollaert & A. J. Schleiss (2010). Comprehensive system analysis of a multi-purpose run-of-river power plant with holistic qualitative assessment. International Journal of River Basin Management 8(3-4).
- 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.
- Illwerke vkw (2009). Kopswerk II - Das grösste Pumpspeicherkraftwerk der Vorarlberger Illwerke AG. Informationsbroschüre Vorarlberger Kraftwerke AG, Bregenz, Österreich.
- IRKA (2012). Zukunft Alpenrhein. Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile. IRKA - Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie.
- Jackson, H. M., C. N. Gibbins & C. Soulsby. (2007). Role of discharge and temperature variation in determining invertebrate community structure in a regulated river. River Research and Applications 23(6).
- Jones, J. I., J. F. Muphy, A. L. Collins, D. A. Sear, P. S. Naden & P. D. Armitage (2011). The impact of fine sediment on macro-invertebrates. River Research and Application 27.
- Jorde, K., M. Schneider & F. Zoellner (2000). Analysis of instream habitat quality – preference functions and fuzzy models. In *Stochastic Hydraulics*. Wang Z. & S. Hu (Ed.). Balkema, Rotterdam.
- KLL (2008). Bericht zur Umweltverträglichkeitsprüfung 2. Stufe, Bestehende Anlagen - Hauptbericht.
- KLL (2007). Übersichtsplan KLL. www.axpo.ch. 03.09.2012.
- Kondolf, G. M. (1995). Five elements for effective evaluation of stream restoration. Restoration Ecology 3(2).
- Kopecki, I., A. Cabaltica, J. Ortlepp, M. Schneider & S. Wieprecht (2012). Physikalische Habitatsmodellierung für die Bewertung ökologischer Auswirkungen des Schwellbetriebs. Wasser-Wirtschaft (1-2).
- Kraftwerke Oberhasli (2011). Aufwertung der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1: Das Wasser effizienter nutzen. Informationsbroschüre, KWO, Innertkirchen.
- Künzli, F. (2009). Schwall/Sunk-Problematik in Schweizer Fliessgewässern. VDM Verlag, Saarbrücken, Deutschland.
- KWO (2008). Kraftwerke Oberhasli AG. Informationsbroschüre KWO AG, Innertkirchen.
- Lagobianco (2011). Konzessionsgenehmigungsgesuch für das Projekt Lagobianco. Informationsbroschüre Lagobianco AG, Poschiavo.
- Layzer, J. B., T. J. Nehus, W. Pennington, J. A. Gore & J. M. Nestler (1989). Seasonal variation in the composition of the drift below a peaking hydroelectric project. Regulated Rivers: Research & Management 3(1).

-
- Limnex (2004). Auswirkungen des Schwallbetriebs auf das Ökosystem der Fließgewässer: Grundlagen zur Beurteilung. Bericht zuhanden des WWF Schweiz.
- Limnex (2006). Schwallversuche in der Linth. Ökologische Auswirkungen von schwalldämpfenden Massnahmen. Bericht z. H. Amt für Umweltschutz, Kanton Glarus.
- Limnex (2007). Morphologie und Schwallbetrieb in Fließgewässern. Bericht zuhanden des BAFU.
- Limnex (2009). Schwall/Sunk in der Hasliaare. Bericht zuhanden Kraftwerke Oberhasli.
- Lloyd, D. S., J. P. Koenings & J. D. Laperriere (1987). Effects of turbidity on fresh waters of Alaska. *North American Journal of Fisheries Management* 7(1).
- Meier, W., M. Frey, L. Moosmann, S. Steinlin und A. Wüest (2004). Wassertemperaturen und Wärmehaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche. Schlussbericht von SP I-2 des Rhone-Thur Projektes. EAWAG, Kastanienbaum.
- Meier, W. & A. Wüest (2004). Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? *Wasser Energie Luft* 96(11/12).
- Meile, T., M. Fette & P. Baumann (2005). Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projekts. Eawag, Kastanienbaum.
- Meile, T. (2008). Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel. Dissertation. EPFL, Lausanne.
- Mendez, R. (2007). Laichwanderung der Seeforelle im Alpenrhein. Diplomarbeit. Eawag, Kastanienbaum.
- Minor, H.-E. & G. Möller (2007). Schwall und Sunk, technisch-ökonomische Situation in den grösseren Flussgebieten der Schweiz. *Wasser Energie Luft* 99(1).
- 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).
- Nagrodski, A., G. D. Raby, C. T. Hasler, M. K. Taylor & S. J. Cooke (2012). Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation. *Journal of Environmental Management* 103.
- Naiman, R. J., J. J. Latterell, N. E. Pettit & J. D. Olden (2008). Flow variability and the biophysical vitality of river systems. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Geoscience* 34.
- Paetzold, A., C. Yoshimura & K. Tockner (2008). Riparian arthropod responses to flow regulation and river channelization. *Journal of Applied Ecology* 45(3).
- Parasiewicz, P., S. Schmutz & O. Moog (1998). The effect of managed hydropower peaking on the physical habitat, benthos and fish fauna in the River Bregenzerach in Austria. *Fisheries Management and Ecology* 5(5).
- Parasiewicz, P. (2001). MesoHABSIM: a concept for application of instream flow models in river restoration planning. *Fisheries* 26
- Parasiewicz P. & J. D. Walker (2007). Comparison of MesoHABSIM with two microhabitat models (PHABSIM and HARPHA). *River Research and Application* 23(8).
- Parasiewicz P., J. N. Rogers, J. D. Legros & M. J. Wirth (2007). Assessment and restoration of instream habitat of the Eightmile River in Connecticut: Developing a MesoHABSIM model. Northeast Instream Habitat Program. University of Massachusetts – Amherst Report.
- Perry, S. A. & W. B. Perry (1986). Effects of experimental flow regulation on invertebrate drift and stranding in the Flathead and Kootenai Rivers, Montana, USA. *Hydrobiologia* 134(2).

- Parkhill, K. L. & J. S. Gulliver (2002). Effects of inorganic sediment on whole-stream productivity. *Hydrobiologia* 472.
- Peter A. & C. Scheidegger (2012). Erfolgskontrolle bei Revitalisierungen. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 8.
- Pfaundler M., C. Dübendorfer & A. Zysset (2011). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. Hydrologie - Abflussregime Stufe F (flächendeckend). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1107.
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Preestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks & J. C. Stromberg (1997). The natural flow regime. *BioScience* 47(11).
- Portmann, M., P. Baumann & B. Imhof (2004). Schwebstoffhaushalt und Trübung der Rhone. Publikation des Rhone- Thur Projektes., EAWAG, Kastanienbaum.
- Resh, V. H., A. V. Brown, A. P. Covich, M. E. Gurtz, H. W. Li, G. W. Minshall, S. R. Reice, A. L. Sheldon, J. B. Wallace & R. C. Wissmar (1988). The role of disturbance in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society* 7(4).
- Ribi, J.-M. (2012). Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. Dissertation. EPFL, Lausanne.
- Richter, B. D. & G. A. Thomas (2007). Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecology and Society* 12(1).
- Rousselot, P., D. Vetsch & R. Fähr (2012). Numerische Fließgewässermodellierung. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 7.
- SAH (2004). Geschiebestudie Linth. Bericht des Ingenieurbüros Schälchli, Abegg & Hunzinger im Auftrag der Baudirektion des Kantons Glarus und der Linthverwaltung, Glarus.
- Saltveit, S. J., J. H. Halleraker, J. V. Arnekleiv & A. Harby (2001). Field experiments on stranding in juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regulated Rivers: Research & Management* 17(4-5).
- Schälchli U. (1993). Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich Nr. 124
- Schmid, M., D. F. McGinnis & A. Wüest (2008). Simulation der Auswirkungen eines allfälligen Pumpspeicherbetriebs auf Schichtung und Trübung im Lago di Posciavo und im Lago Bianco. Eawag, Kastanienbaum.
- Schmid, M. & A. Wüest (2009). Simulation der Auswirkungen eines allfälligen Pumpspeicherbetriebs auf Schichtung und Trübung im Lago di Posciavo und im Lago Bianco: Ergänzende Szenarien. Eawag, Kastanienbaum.
- Schmocker, L., M. Wickenhäuser, G. Möller & H.-E. Minor (2007). Machbarkeit und Kosten der Schwallreduktion in der Schweiz. VAW-ETH Zürich und LCH-EPF Lausanne. VAW Bericht Nr. 4250.
- 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.
- Schuwirth, N., M. Kühni, S. Schweizer, U. Uehlinger & P. Reichert (2008). A mechanistic model of benthos community dynamics in the River Sihl, Switzerland. *Freshwater Biology* 53(7).
- Schuwirth, N. & P. Reichert (2012). Das Vorkommen von Lebewesen vorhersagen. Eawag News 72.
- Schweizer, S., J. Neuner & N. Heuberger (2009). Bewertung von Schwall/Sunk - Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts. *Wasser Energie Luft* 101(3).

-
- Schweizer, S., J. Neuner, M. Ursin, H. Tscholl & M. Meyer (2008). Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. *Wasser Energie Luft* 100(3).
- Schweizer, S., M. Meyer, N. Heuberger, S. Brechbühl & M. Ursin (2010). Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli: wichtige Unterstützung des partizitiven Begleitprozesses von KWOpplus. *Wasser Energie Luft* 102(4).
- Schweizer, S., H. Zeh Weissmann & M. Ursin (2012). Der Begleitgruppenprozess zu den Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. *Wasser Energie Luft* 104(1).
- Scruton, D., C. Pennell, L. Ollerhead, K. Alfredsen, M. Stickler, A. Harby, M. Robertson, K. Clarke & L. LeDrew (2008). A synopsis of „hydropeaking“ studies on the response of juvenile Atlantic salmon to experimental flow alteration. *Hydrobiologia* 609(1).
- Shaw, E. A. & J. S. Richardson (2001). Direct and indirect effects of sediment pulse duration on stream invertebrate assemblages and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(11).
- Shen, Y. & P. Diplas (2010). Modeling unsteady flow characteristics of hydropeaking operations and their implications on fish habitat. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(12).
- VAW (2006). Kraftwerkbedingter Schwall und Sunk. Eine Standortbestimmung. VAW-ETH Zürich und LCH-EPF Lausanne. VAW Bericht Nr. 4243.
- VERBUND - Austrian Hydropower (2004). Strom aus Enns, Mur und Teigitsch. Die steirischen Wasserkraftwerke. Informationsbroschüre VERBUND AG, Wien.
- Weitkamp, D. E. & M. Katz (1980). A review of dissolved gas supersaturation literature. *Transactions of the American Fisheries Society* 109.
- Werlen, K. (2011). Schwall/Sunk: Optimales Abflussregime für Wasserkraftwerke. *Wasser Energie Luft* 103(1).
- Wickenhäuser, M., W. Hauenstein & H.-E. Minor. (2005). Massnahmen zur Schwallspitzenreduktion und deren Auswirkungen. *Wasser Energie, Luft* 97(1/2).
- Wüest A., A. Bruder, A. Peter & S. Vollenweider (2012). Potenzial und Grenzen der Wasserkraft. *Eawag News* 72.
- Young, P. S., J. J. Cech Jr. & 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).
- Zolezzi, G., A. Siviglia, M. Toffolon & B. Maiolini (2011). Thermopeaking in Alpine streams: event characterization and time scales. *Ecohydrology* 4(4).
- Zolezzi, G. (2012). Hydro- and Thermopeaking - From mitigation to compensation (and maybe both). Vortrag an der Fachtagung „International Workshop on Hydropeaking“ der Alpenkonvention vom 19. Juni 2012 in Dübendorf.
- Zurwerra, A. & M. Bur (2009). Abschätzung der Schäden an Fischen und Nährtieren in einer Schwall-Sunk-Strecke der Saane (Freiburg, Schweiz). *Wasser Energie Luft* 101(4).

Kapitel 9

Anhang

9.1 Expertenworkshop

Ein Expertenworkshop zur Diskussion und Erarbeitung von Prognostizierungsmöglichkeiten von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen wurde am 20. Juni 2012 in der Empa-Akademie in Dübendorf durchgeführt. Er wurde vom Projektteam organisiert und von Tobias Buser, WSL moderiert. Für den Workshop wurden Experten mit Erfahrungen aus den meisten Ländern, in denen die Schwall/Sunk-Problematik relevant ist, eingeladen. Bei der Auswahl der Teilnehmer wurde bewusst darauf geachtet, dass sie aus verschiedenen wissenschaftlichen Tätigungsfeldern kommen (Ökologen, Hydrauliker und Modellierer), da die Diskussion der Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten und die Verbesserung der Prognostizierungsansätze im Vordergrund stand. Sozio-ökonomische Aspekte der Umsetzung waren für den Workshop hingegen sekundär.

Die Ziele des Workshops waren folgende:

- Beurteilung von Indikatoren und Modellen zur Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten auf die Gewässerökologie unter verschiedenen Sanierungsmassnahmen
- Beurteilung der Eignung von verschiedenen Prognostizierungsansätzen
- Austausch von Erfahrungen in der Prognostizierung von Schwall/Sunk-Effekten und deren Sanierung
- Diskussion von Forschungsrichtungen und -projekten zur Unterstützung der Prognostizierung

Durch diese Ausrichtung unterstützte der Workshop die Entwicklung von Empfehlungen zum Vorgehen bei der Prognostizierung von Sanierungsmassnahmen. Forschungsvorschläge zum Schliessen von Wissenslücken in der Anwendung von Prognostizierungsansätzen konnten aus Zeitgründen nicht während dem Workshop selber besprochen werden. Diese Diskussionen mussten im Anschluss an den Workshop schriftlich geführt werden.

9.1.1 Teilnehmer

Dr. Andreas Bruder, Eawag, Schweiz

Stefan Vollenweider, Wasser-Agenda 21, Schweiz

Dr. Steffen Schweizer, KWO, Schweiz

Dr. Martin Huber, BAFU, Schweiz

Dr. Armin Peter, Eawag, Schweiz

Irène Schmidli, BAFU, Schweiz

Dr. Diego Tonolla, BAFU, Schweiz

Tor Haakon Bakken, SINTEF, Norwegen

Dominique Courret, IMFT, Frankreich

Jo Halvard Halleraker, DIRNAT, Norwegen

Dr. Christoph Hauer, BOKU, Österreich

Prof. Dr. Klaus Jorde, ENTEC und BFE, Schweiz

Dr. Bruno Maiolini, IASMA, Italien

Dr. Andreas Melcher, BOKU, Österreich

Dr. Piotr Parasiewicz, S. Sakowicz Institut für Binnenfischerei, Polen

Dr. Ulrich Pulg, Universität Bergen, Norwegen

Prof. Dr. Anton Schleiss, EPFL, Schweiz

Dr. Matthias Schneider, SJE, Deutschland

Johannes Schnell, Landesfischereiverband Bayern, Deutschland

Dr. Annunziato Siviglia, Universität Trento, Italien

Dr. Guido Zolezzi, Universität Trento, Italien

9.1.2 Beurteilung der Schwall/Sunk-Indikatoren

Die Liste der Schwall/Sunk-Indikatoren (Tab. 9.1) wurde durch die Workshopteilnehmer angepasst und die Indikatoren nach ihrer Beeinflussung durch Schwall/Sunk und ihrer Prognostizierbarkeit bewertet (Tab. 9.1, Abb. 7.1). Dies war die Grundlage für die Zusammenstellung des Indikatorensets zur Prognostizierung der Effekte von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen auf die Hydrologie, die Hydraulik und die Gewässerökologie der Schwallstrecke (Tab. 7.1).

Tabelle 9.1: Beurteilung der Schwall/Sunk-Indikatoren durch die Workshopteilnehmer (Werte von 0 bis 3 mit 0: nicht durch Schwall/Sunk beeinflusst und nicht prognostizierbar und 3: stark von Schwall/Sunk beeinflusst und gut prognostizierbar). Da die Bewertung zum Teil in Kleingruppen stattgefunden hatte, konnte die Varianz der Bewertung zwischen den Kleingruppen festgehalten werden. SA = Standardabweichung, EPT = Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen. Zur Verbesserung der Übersicht sind einige Zeilen grau hinterlegt.

Indikator	Beeinflussung durch Schwall/Sunk (SA)	Prognostizierbarkeit (SA)
Fischdiversität	2.7 (0.5)	0.8 (0.6) ^{a)}
Fischbiomasse ^{b)}	3.0 (0.0)	1.5 (0.5) ^{a)}
Stranden von Fischen	3.0 (0.0)	2.8 (0.2)
Laichfläche der Fische	3.0 (0.0)	3.0 (0.0)
Reproduktion der Fischfauna ^{c)}	2.8 (0.3)	0.8 (0.8)
Fischereiliche Produktivität	0.5 (0.4)	0.3 (0.5)
Makrozoobenthosdiversität	2.5 (0.4)	1.2 (1.0) ^{a)}
Biomasse des Makrozoobenthos	2.7 (0.5)	0.7 (0.5) ^{a)}
Stranden von Makrozoobenthos	2.0 (1.4) ^{d)}	1.8 (1.3) ^{d)}
Längenzonation des Makrozoobenthos ^{e)}	1.3 (1.2)	1.3 (0.5)
EPT-Familien Makrozoobenthos	2.5 (0.4)	1.8 (0.6) ^{e)}
Drift von Fischen und Makrozoobenthos	3.0 (0.0)	2.0 (0.4)
Periphytonbiomasse	0.8 (0.6)	0.3 (0.5)
Mindestabfluss	0.0 (0.0)	3.0 (0.0)
Temperaturveränderung	3.0 (0.0)	2.7 (0.5)
Innere Kolmation ^{f)}	1.5	1.0
Veränderung der Trübung	2.5 (0.4)	2.0 (0.0)
Sedimentregime ^{g)}	2.5	1.5
Veränderung der benetzten Fläche ^{f)}	3.0	3.0
Laterale Konnektivität ^{f)}	2.0	3.0
Hydrologie ^{f)}	3.0	3.0
Wasserqualität ^{f)}	1.5	2.0
Eisproduktion ^{f)}	1.0	1.0

^{a)}: Die Prognostizierbarkeit ist grösser, wenn die Veränderungen im Vergleich zum vorgängigen Zustand prognostiziert werden.

^{b)}: Eine Kleingruppe hat diesen Indikator nicht bewertet, da sie der Ansicht war er sollte durch Abundanz ersetzt werden.

^{c)}: Eine Kleingruppe hat diesen Indikator nicht bewertet, da sie der Ansicht war er sollte in der Fischdiversität integriert sein.

^{d)}: Hohe Standardabweichung, da wenig bekannt ist über das Überleben der Tiere im Substrat der Wasserwechselzone.

^{e)}: Die Teilnehmer waren der Ansicht, dass dieser Indikator noch sehr unspezifisch ist und mehr Forschung notwendig wäre.

^{f)}: Dieser Indikator wurden im Plenum diskutiert, dadurch konnte die Standardabweichung nicht erfasst werden.

^{g)}: Dieser Indikator wurde nur von einer Kleingruppe bewertet, dadurch konnte die Standardabweichung nicht erfasst werden.

Ein weiteres Resultat dieses Arbeitsschrittes war eine Diskussion der Indikatoren die auch für die Erfassung des Ist-Zustandes relevant sind (Baumann et al. 2012). Dabei wurden verschiedene Verbesserungsvorschläge formuliert:

- Statt der Biomasse der Fische und Makroinvertebraten sollte deren Abundanz erfasst werden, da diese einfacher zu messen und zu prognostizieren ist.
- Das Ausmass der Drift sollte nicht als Biomasse ausgedrückt werden sondern ebenfalls als Abundanz. Dadurch ist sie einfacher mit der gesamten Biomasse vergleichbar.
- Statt der Anzahl EPT-Familien sollte die Anzahl EPT-Gattungen verwendet werden, da dadurch eine genauere Aussage der Beeinträchtigung des Makrozoobenthos möglich ist.
- Wenn möglich sollten quantitative Aussagen über Veränderungen der Indikatoren nach der Sanierung gemacht werden, da diese genauere Aussagen erlauben.

9.2 Beschreibung der Fallstudien

9.2.1 Kraftwerke Oberhasli

Die Kraftwerke Oberhasli (KWO) sind an der Ausarbeitung von drei Ausbauprojekten. Zusammengefasst unter dem Namen KWOpus sind dies: „Tandem“, das einen zweiten Druckstollen in der Kraftwerkskette Handeck-Innertkirchen zur Verringerung der Reibungsverluste vorsieht, „Grimsel 3“ für ein neues Pumpspeicherwerk zwischen dem Oberaarsee und dem Räterichsbodensee, sowie eine Erhöhung der Grimselstaumauer (Schweizer et al. 2010). Um die ökologischen Beeinträchtigungen durch Schwall/Sunk als Folge der bestehenden und geplanten Einrichtungen zu verringern, ist ein Beruhigungsbecken unterhalb der Zentrale Innertkirchen 2 geplant. Diese Ausbauten bedingen eine Umweltverträglichkeitsprüfung mit gewässerökologischen Untersuchungen zu den Auswirkungen des Kraftwerkbetriebes auf die Schwallstrecke.

Beschreibung der Kraftwerke und der Schwallstrecke

Die KWO betreiben mehrere Kraftwerksstufen an der Hasliaare mit mehreren Speicherseen und weitere Laufwasserkraftwerke im Gadmertal. Das turbinierte Wasser aus dem Einzugsgebiet der Hasliaare und des Urbachwassers wird in das Gadmerwasser eingeleitet, ca. 50 m vor dessen Mündung in die Hasliaare (Abb. 9.1). Ein Teil des Wassers aus dem Einzugsgebiet des Gadmerwassers wird in der Zentrale Innertkirchen 2 turbiniert und dann etwa 50 m nach der Mündung des Gadmerwassers direkt der Hasliaare zugeführt. Durch eine Verbindung kann Wasser zwischen den Einzugsgebieten von Hasliaare, Gadmerwasser und Urbachwasser ausgetauscht werden.

Die Einleitung von turbiniertem Wasser führt zu ausgeprägtem Schwall/Sunk in der Hasliaare (Tab. 9.2). Die Schwallstrecke beginnt nach der Einleitung, im letzten Abschnitt des Gadmerwassers und endet nach etwa 16 km im Brienersee. Die Schwallstrecke lässt sich morphologisch grob in vier Abschnitte unterteilen: eine Bühnenstrecke von der Einleitung bis zur Aareschlucht (ca. 0.7 km), die Aareschlucht (ca. 1.5 km), eine Kiesbankstrecke (ca. 1.5 km) und die kanalisierte Strecke bis zum Brienersee (ca. 12 km). Die Morphologie der Schwallstrecke ist in der Kiesbankstrecke am vielfältigsten und daher für gewässerökologischen Untersuchungen der Auswirkungen von Schwall/Sunk besonders relevant (Baumann et al. 2012, Schweizer et al. 2010).

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Auswirkungen des Kraftwerkbetriebs und des geplanten Beruhigungsbeckens auf die Gewässerökologie der Schwallstrecke wurde mit umfassenden Untersuchungen während dem regulären Betrieb aber auch während Schwallversuchen abgeschätzt (Limnex 2009, Schweizer et al. 2010). Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen wurden mit jenen aus mehreren Referenzstrecken verglichen. Diese umfassten die Restwasserstrecke der Hasliaare, die weisse Lütschine (bei Gsteig und Zweilütschinen).

In der Schwallstrecke kommen alle standortgerechten Fischarten (Bachforelle, Seeforelle und Groppe), sowie eine hohe Artenvielfalt des Makrozoobenthos vor. Verschiedene Organismengruppen sind dennoch durch das unnatürliche Abflussregime stark beeinträchtigt. So wurde eine hohe Drift nachgewiesen (Schweizer et al. 2010), was sich negativ auf die Biomasse des Makrozoobenthos und wahrscheinlich auch auf die Fischlarven auswirkt. Adulte Tiere verschiedener Fischarten (z. B. Seeforellen) können aber trotz Schwall/Sunk in der Hasliaare aufwandern.

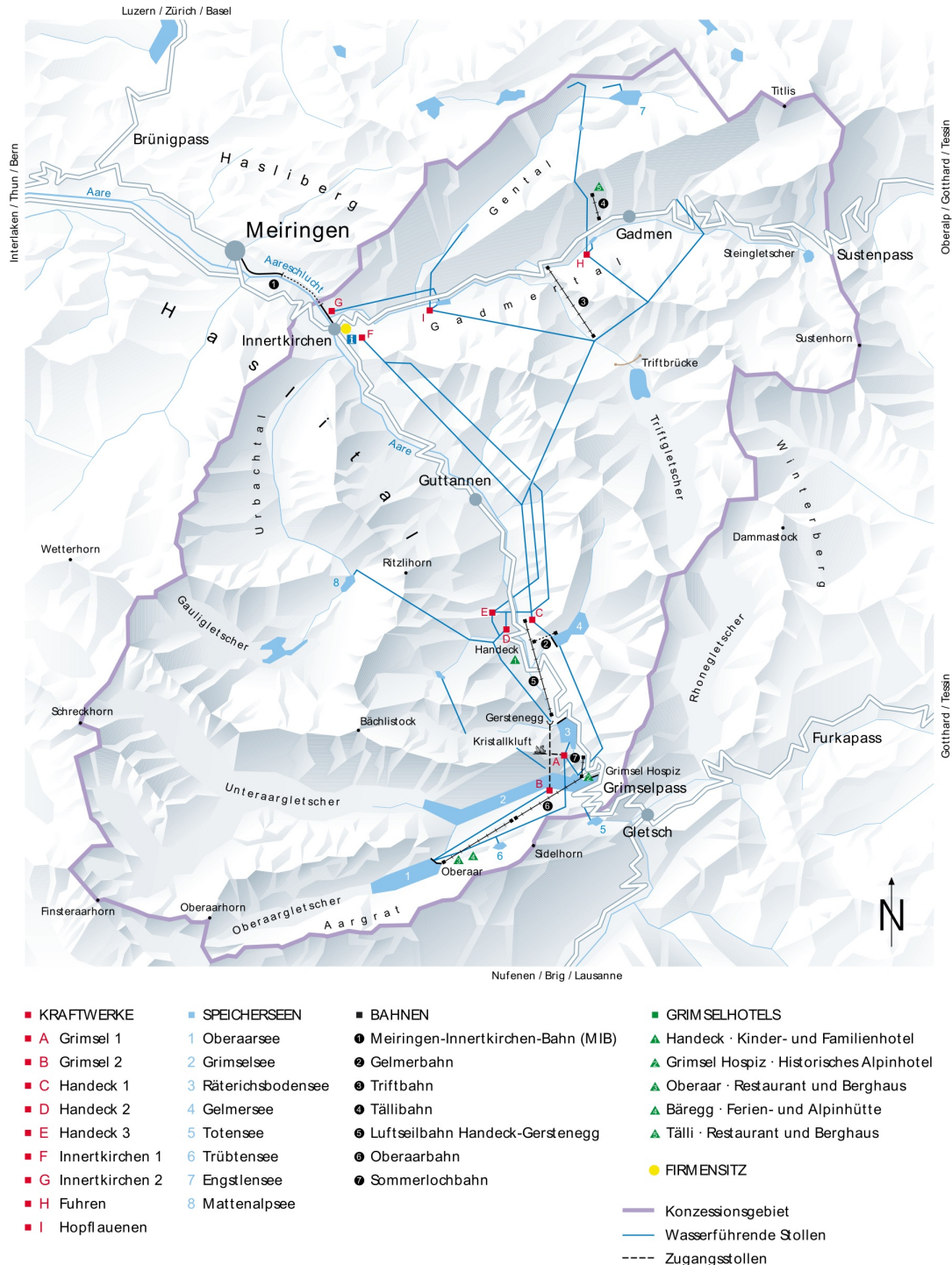


Abbildung 9.1: Einzugsgebiet und Installationen der Kraftwerke Oberhasli (aus KWO 2008)

Tabelle 9.2: Eigenschaften der Kraftwerke Oberhasli und der Schwallstrecke

Eigenschaft	Aktuell (nach Ausbau)
Mittlerer Jahresabfluss (m^3s^{-1})	35
Abfluss vor Wasserrückgabe (m^3s^{-1})	1 (Winter), 13 (Sommer)
Einzugsgebietsfläche (km^2)	450 (davon genutzt 350)
Vergletscherung des Einzugsgebiets (%)	21
Korngrößenverteilung (cm)	$d_m = 13 / d_{90} = 32$
Speichervolumen (m^3)	197.5 Mio
Mittlere Stromproduktion (GWh a^{-1})	2350
Maximale Turbiniermenge (m^3s^{-1})	70 (95)
Schwall/Sunk-Verhältnis (an 95% der Wintertage)	8:1 ^{a)}
Mittlere Schwallraten ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{min}^{-1}$)	0.15 - 0.25
Mittlere Sunkraten ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{min}^{-1}$)	0.11 - 0.19
Maximale Pegelanstiegsraten (cm min^{-1})	1 - 10
Maximale Pegelrückgangsraten (cm min^{-1})	0.4 - 2

^{a)}: Durch die Sanierungsmassnahmen könnte dieser Wert auf 4.5:1 reduziert werden.

Das Stranden von Fischen und des Makrozoobenthos wird momentan gezielt untersucht. Die Gefahr durch Stranden und Trockenfallen besteht höchstens in der Kiesbank- und der Bühnenstrecke, und ist in den restlichen Abschnitten aufgrund deren gleichförmiger Morphologie wohl unbedeutend. So sind aus Beobachtungen während der gesamten Betriebszeit der KWO nur zwei Fälle von gestrandeten Fischen bekannt, in beiden Fällen herrschte extrem tiefer Abfluss.

Ein Aufreissen der Gewässersohle der Schwallstrecke während Schwallphasen ist unter durchschnittlichen Abflussbedingungen aufgrund des relativ groben Substrats (Tab. 9.2) selten. Starke Hochwasserereignisse können zu einem Aufreissen führen, dies findet jedoch fast ausschliesslich im Sommer statt und wird durch den Kraftwerksbetrieb nur geringfügig beeinflusst (Schweizer et al. 2008).

Zusätzlich zu den diesen gewässerökologischen Untersuchungen wurden und werden mehrere von KWO mitfinanzierte Forschungsprojekte an der Eawag, der EPFL und der FH Fribourg durchgeführt. Dabei wurden hydraulische und hydrologische Modellrechnungen (Schweizer et al. 2010, Bieri 2012) sowie ein physikalisches Modell des Beruhigungsbeckens eingesetzt. Momentan sind weitere Arbeiten in Zusammenarbeit mit der Eawag kurz vor dem Abschluss (eine Dissertation von E. Person und eine Masterarbeit von D. Tanno) in denen die Auswirkungen von Schwall/Sunk und Sanierungsmassnahmen auf die Habitatsverfügbarkeit für Fische und das Makrozoobenthos abgeschätzt werden.

Erkenntnisse für die Sanierungsmassnahmen

Aus diesen Untersuchungen und Projekten können grobe Abschätzungen über die hydrologischen und hydraulischen Veränderungen durch die Wirkung eines Beruhigungsbeckens gemacht werden. Durch das Beruhigungsbecken könnte das Schwall/Sunk-Verhältnis von aktuell 8:1 auf 5:1 verringert werden (an 95% der Wintertage), dies auch bei einer Erhöhung der maximalen turbinieren Wassermenge um etwa ein Drittel im Rahmen der Ausbauprojekte. Zusätzlich würden die Schwallraten bei optimalem Betrieb des Beruhigungsbeckens von aktuell maximal $10.8 \text{ m s}^{-3} \text{ min}^{-1}$ auf $1.8 \text{ m s}^{-3} \text{ min}^{-1}$ reduziert, dies zum Beispiel bei einem Maximalabfluss von $62 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Schweizer et al. 2010). Die Schwallversuche haben auch gezeigt, dass das Beruhigungsbecken die Beeinträchtigungen der Fliessgewässerorganismen deutlich reduzieren kann. Der grösste Effekt ist dabei auf die Drift

zu erwarten, da sich aufgrund der tieferen Abflusszunahmeraten längere Reaktions- und Fluchtzeiten für die Organismen ergeben (Schweizer et al. 2010).

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Zur Reduzierung von Schwall/Sunk im Gadmerwasser und der Hasliaare ist ein Beruhigungsbecken mit einem Volumen von 22'000 m² neben der Zentrale Innertkirchen 2 geplant. Zusätzlich können noch 25'000 m³ Speichervolumen im Unterwasserstollen genutzt werden (Schweizer et al. 2008). Durch diese beiden Sanierungsmassnahmen könnte das Schwall/Sunk-Verhältnis in der Hasliaare unterhalb der Einleitung auf 4.5:1 reduziert werden.

Neben dem beschriebenen Beruhigungsbecken wurden von der KWO weitere Sanierungsmassnahmen diskutiert. Zum Einen eine Direktableitung des turbinierten Wassers in den Brienersee, was aber aufgrund der grossen Distanz zum See und der daraus resultierenden grossen Kosten nicht weiterverfolgt wurde. Des Weiteren wurde der Bau eines zweiten Beruhigungsbeckens auf der Landwirtschaftsfläche südwestlich der Bühnenstrecke diskutiert; aufgrund der vielen Landbesitzer und der grossen landwirtschaftlichen Bedeutung dieser Flächen gestalten sich die Verhandlungen sehr aufwändig und ist deren Ausgang ungewiss. Betriebliche Massnahmen zur Minderung von Schwall/Sunk-Effekten wurden nicht berücksichtigt, da deren Kosteneffizienz in vergleichbaren Fällen klar unterhalb derjenigen des Beruhigungsbeckens liegt (Wickenhäuser et al. 2005).

Für die Dimensionierung des geplanten Beruhigungsbeckens war die verfügbare Fläche limitierend, welche mit verhältnismässigem zeitlichem und finanziellem Aufwand zur Verfügung gestellt werden konnte. Diese Fläche war schon zu Beginn der Planungen im Besitz der KWO, gilt aber aufgrund der Nähe zur Hasliaare als Gewässerraum. Unterhalb der Einleitung werden im Rahmen von morphologische Revitalisierungsmassnahmen eine Ausweitung des Flussbettes in der heute kanalisierten Strecke diskutiert. Dies würde neben der grösseren Habitatsvielfalt auch eine dämpfende Wirkung auf den Schwall/Sunk haben (vor allem auf das Schwall/Sunk-Verhältnis und die Abflussänderungsraten).

Kooperationen bei der Planung der Massnahmen

Während der Planung für das Ausbauprojekts „Tandem“ wurden verschiedene Umweltverbände (ProNatura, BKFV, Grimselverein, sowie weitere vertreten durch ProNatura) vor der offiziellen Auflage des Baugesuchs über das vorgesehene Ausgleichsbeckens informiert. Die Verbände waren mit den Plänen überwiegend einverstanden und sahen von einer Einsprache gegen das Baugesuch ab. Die Zusammenarbeit mit den Behörden des Kantons Bern umfasste Diskussionen während der Planungsphase mit dem Oberingenieurkreis, dem Fischereiinspektorat, dem Amt für Wasser und Abfall, dem Amt für Raumordnung sowie der Abteilung für Naturförderung und dem kantonalen Gewässer- und Bodenschutzlabor.

Rückblickende Diskussion der Vorgehensweise

Während den gewässerökologischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Weisse Lütchine als Referenzgewässer ungeeignet war, da sie zu jener Zeit durch Hochwasser und Baggerarbeiten im Gewässer gestört wurde. Als Ersatz wurde die Verwendung von Resultaten aus der Rhone vorgeschlagen (Limnex 2009).

Durch die proaktive Vorgehensweise beim Einbezug der Interessengruppen in die Planung konnte KWO deren Vorschläge und Bedenken frühzeitig einbeziehen. Neben der Be-

rücksichtigung verschiedener Ansichten hatte dieses Vorgehen den Vorteil, dass langfristige Verhandlungen und Verzögerungen des Bewilligungsverfahrens vermieden werden konnten.

9.2.2 Kraftwerke Linth Limmern

Die Axpo und der Kanton Glarus betreiben im Linthal die Kraftwerke Linth-Limmern (KLL). Das Ausbauprojekt Linthal 2015 (AXPO 2010) bedingte eine Konzessionserneuerung inklusive mehrstufiger Umweltverträglichkeitsprüfung und den dafür notwendigen gewässerökologischen Untersuchungen. Für die UVP mussten aktuelle und zukünftige Auswirkungen des Schwall/Sunks sowie mögliche Massnahmen zu deren Reduktion beurteilt werden. Unabhängig von diesem Verfahren hat das Amt für Umweltschutz des Kantons Glarus Untersuchungen zu den Möglichkeiten der Reduktion von Schwall/Sunk in der Linth angestrebt. Aufgrund der Ähnlichkeit der Fragestellung dieser beiden Vorhaben wurden die Untersuchungen koordiniert durchgeführt.

Beschreibung der Kraftwerke und der Schwallstrecke

Die bestehenden Anlagen umfassen mehrere Wasserfassungen im oberen Linthal sowie an der Sernf (Abb. 9.2). Das Wasser wird im Stausee Limmernboden (92 Mio m³), im Muttsee (9 Mio m³) und im Beruhigungsbecken Hintersand (110'000 m³) gespeichert und dann über mehrere Zentralen (Zentralen Muttsee, Tierfehd und Linthal) abgearbeitet. Zusätzlich bestehen im Tierfehd (210'000 m³, nach dem Ausbau Linthal 2015: 560 000 m³) und in Linthal (210'000 m³) Beruhigungsbecken (Abb. 9.3), wovon dasjenige in Tierfehd ebenfalls zur Speicherung genutzt werden kann. Das gesamte turbinierete Wasser wird nach dem Beruhigungsbecken bei Linthal in die Linth eingeleitet. In der Regel führt die Einleitung von turbinieretem Wasser zu 1-2 Schwallereignissen mit 25 - 32 m s⁻³ an winterlichen Werktagen (Tab. 9.3).

Tabelle 9.3: Eigenschaften der Kraftwerke Linth-Limmern und der Schwallstrecke (aus KLL 2007).

Eigenschaft	Aktuell (nach Ausbau)
Mittlerer Jahresabfluss vor Wasserrückgabe (m ³)	6.4
Mittlerer Winterabfluss (Dez - Feb) vor Wasserrückgabe (m ³)	3.3
Einzugsgebietsfläche (km ²)	140
Vergletscherung des Einzugsgebiets (%)	13.2
Speichervolumen (m ³)	101.3 Mio (117.9 Mio)
Mittlere Stromproduktion (GWh a ⁻¹)	460
Ausbauleistung (MW)	480 (1480)
Maximaler Abfluss bei Einleitung (m ³ s ⁻¹)	32 ^{a)}
Minimale Restwassermenge vor Einleitung (m ³ s ⁻¹)	2.5
Maximales Schwall/Sunk-Verhältnis	14
Maximale Pegelanstiegsraten (cm min ⁻¹)	3.1
Maximale Pegelrückgangsraten (cm min ⁻¹)	1.2

^{a)}: Durch die Sanierungsmassnahmen könnte dieser Wert im Winter auf 20 m³ s⁻¹ reduziert werden.

Kleinere Kraftwerke leiten ebenfalls in die Linth ein und können zum Teil den Schwall/Sunk verschärfen. Das Fätschbachwerk leitet in die Restwasserstrecke kurz vor dem Beruhigungsbecken Linthal ein, das Niederenbachwerk in die Sernf kurz vor deren Einmündung in die Linth. Das Löntschwerk leitet ausserdem in die Löntsch ein, welche bei Netstal in die Linth mündet. Zusätzlich sind in der Schwallstrecke mehrere kleinere Laufwasserkraftwerke installiert, die zum Teil keine oder nur sehr geringe Restwassermengen abgeben und darum

in Zeiten der Produktion das Schwall/Sunk-Verhältnis in der Linth deutlich erhöhen (siehe auch SAH 2004 und Limnex 2006). Da diese Kraftwerke den erhöhten Abfluss bei Schwall erst bei Überschreitung ihrer Fassungskapazität und somit sprunghaft in die Schwallstrecke weitergeben, erhöhen sie auch die Schwallraten.

Die Schwallstrecke ist bis zum Zufluss der Sernf in Schwanden (ca. 11.2 km unterhalb der Einleitung) überwiegend begradigt und kanalisiert. Da die Linth in diesem Bereich auch im ursprünglichen Zustand nicht stark verzweigt war, hat sich deren morphologische Strukturvielfalt mit dem Bau der KLL nicht stark verändert.

Im Rahmen des Projekts Linthal 2015 wird ein neues unterirdisches Pumpspeicherwerk (1000 MW Turbinier- und Pumpleistung) zwischen dem Limmernsee und dem Muttsee gebaut. Zusätzlich wird die Staumauer und das Volumen des Muttsees erhöht (von 9 auf 25 Mio. m³), sowie ein zusätzliches Beruhigungsbecken in Tiefehd (350'000 m³) gebaut. Das neue Ausgleichsbecken Tiefehd soll im Jahre 2012 zur Verfügung stehen und die ersten Turbinen des neuen Kraftwerks im Jahre 2015 in Betrieb gehen.

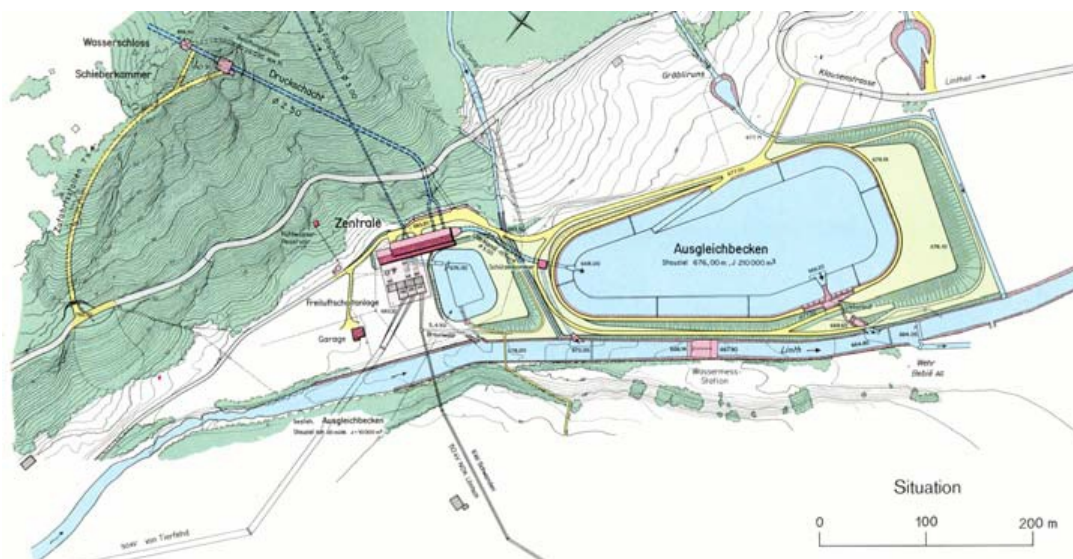


Abbildung 9.3: Situationsübersicht beim Kraftwerk und Beruhigungsbecken Linthal mit der Einleitung in die Schwallstrecke. Die Fließrichtung der Linth ist auf dieser Karte von links nach rechts (aus KLL 2008).

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Untersuchungen zu den Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie wurden während Schwallversuchen mit vier Abflussszenarien durchgeführt, die sich in den Werten der Abflussextreme und den Abflussänderungsraten deutlich unterschieden (Linx 2006). In einem Abflussszenario wurde ausserdem ein Vorschwall simuliert. Die erhobenen Parameter umfassten neben den physikalischen Bedingungen (Hydraulik, Schwebstoff- und Temperaturdynamik, Morphologie) auch die Auswirkungen auf die Biozönose (Biomasse der Algen, Makrozoobenthos und Fische sowie das Ausmass der Drift und die Habitatverfügbarkeit).

Zur Unterstützung der gewässerökologischen Untersuchungen wurde ein hydraulisches Modell für die Strecke von Linth bis Mollis erstellt, mit dem Abflussszenarien bei unter-

schiedlichen Betriebs- respektive Steuerungsweisen der Kraftwerke und der Beruhigungsbecken berechnet werden können.

Die Invertebratendrift war während dem extremen Abflussszenario mit einem Schwall/Sunk-Verhältnis von 15.0:1 (31.5 zu $2.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) und extremen Abflussänderungsraten (Anstieg: $73.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$, Rückgang: $-77.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1}$) sehr hoch, jedoch in einigen Versuchsstrecken auch schon bei deutlich geringeren simulierten Schwallereignissen (Limnex 2006). Die Auswirkungen der Schwallereignisse auf die Invertebratendrift wurde jedoch stark durch die Gewässermorphologie beeinflusst. Die Schwallversuche haben ausserdem gezeigt, dass die für den Laich von Bach- und Seeforellen geeigneten Kiesflächen in der aktuellen Situation bei jedem Schwall mit einem Abfluss von $> 20 \text{ m s}^{-3}$ umgeschichtet werden, wodurch der darin abgelegte Laich beschädigt wird.

Erkenntnisse für die Sanierungsmassnahmen

Basierend auf den Ergebnissen der gewässerökologischen Untersuchungen einigte sich die Begleitgruppe auf die natürliche Reproduktion dieser Fischarten und deren stabile Population in der Linth als ökologische Zielwerte. Die benötigte Laichfläche wurde auf $20'000 \text{ m}^3$ geschätzt und als Zielwert der Sanierung (mit Ausnahme von ausserordentlichen Ereignissen) festgelegt. Da die Verlaichung der Bachforelle während dem gesamten Winters (Oktober - März) stattfindet, soll der Abflussgrenzwert während dieser gesamten Zeitspanne nicht überschritten werden.

Als weiteren hydrologischen Zielwert einigte sich die Begleitgruppe auf einen Minimalabfluss von 2.5 m s^{-3} , womit ein Schwall/Sunk-Verhältnis von 8:1 resultiert, was zwar höher ist als die ebenfalls diskutierte Option von 5:1 (25 zu 5 m s^{-3}), jedoch als ökologisch günstiger angesehen wurde, da der maximale Abfluss für die Fischreproduktion limitierend ist. Die Abflussänderungsraten wurden ebenfalls aufgrund gewässerökologischer Überlegungen begrenzt. Die Abflusszunahmerate darf demnach $1 \text{ m s}^{-3} \text{ min}^{-1}$ nicht überschreiten und die maximale Abflussrückgangsrate liegt bei $1 \text{ m s}^{-3} \text{ min}^{-1}$ für Abflüsse $\geq 16 \text{ m}^3$ und $0.5 \text{ m s}^{-3} \text{ min}^{-1}$ für Abflüsse $< 16 \text{ m}^3$. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass sich reduzierte Abflusszunahmeraten nur am Anfang der Schwallstrecke (bis Schwanden) positiv auswirken, da sich die Schwallwelle mit zunehmender Fliessstrecke aufstellt (Limnex 2006).

Um die Resultate der Defizitanalyse in der Schwallstrecke mit deren unbelasteten Zustand zu vergleichen, wurden mehrere Referenzgewässer untersucht. Diese umfassten unter anderen die Sernf bei Soolsteg (für die Beurteilung von Biomassen des Makrozoobenthos und der Fische). Zusätzliche Abschätzung konnten anhand von gewässerökologischen Untersuchungen in der Linth vor dem Bau der KLL gewonnen werden.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

In den Diskussionen der Begleitgruppe wurde aufgrund der Erkenntnisse aus der Defizitanalyse schnell klar, dass ein Beruhigungsbecken oder ähnliche Massnahmen zur Schwall/Sunk-Minderung ein aus finanziellen Überlegungen unrealistisch grosses Volumen aufweisen müssten, um die oben genannten Abflussvorgaben vollständig erfüllen zu können. Dies vor allem, weil im Talboden kein zusätzliches Land bereit gestellt werden konnte und das Volumen zur Zwischenspeicherung des Schwallabflusses unterirdisch gebaut werden müsste. Aus diesen Überlegungen wurde auch eine separate Einleitung des Schwalls in Schwanden diskutiert, welche jedoch ebenfalls nur eine ungenügend dämpfende Wirkung auf den Abfluss der restlichen Schwallstrecke hätte. Zusätzlich wurde die Ausgestaltung der baulichen

Sanierungsmassnahmen durch die Eigenschaften der Gewässerhoheit im Kt. Glarus erschwert, welche in den Händen der Anrainer liegt. Folglich mussten zusätzlich betriebliche Möglichkeiten einbezogen und schlussendlich auch umgesetzt werden.

Zusätzlich werden und werden verschiedene Revitalisierungsmassnahmen durchgeführt. Diese umfassen morphologische Aufwertungen im Oberlauf der Linth (oberhalb Tierfeld) sowie in mehreren Zuflüssen zur Schwallstrecke. Ausserdem wird die Wasserfassung in der Linthschlucht aufgegeben, was sich günstig auf die Fischpopulation im Oberlauf der Linth auswirken dürfte.

Kooperationen bei der Planung der Massnahmen

Für die Ausgestaltung der Ausbautvorhaben und zur Kompromissfindung der verschiedenen Interessengruppen wurde schon zu Beginn der Planungen eine Begleitgruppe mit Vertretern der KLL, der Axpo, des BAFU, verschiedener Abteilungen der kantonalen Verwaltung Glarus und der Umweltverbände (WWF, Fischereiverband, Stiftung Landschaftsschutz) gebildet.

Umsetzung der Massnahmen

Die neue Betriebsweise soll im Dezember 2016 eingeführt werden. Als Erfolgskontrollen sind dann Erhebungen zu verschiedenen gewässerökologischen Parametern in Intervallen von ca. 3 Jahren vorgesehen. Diese Untersuchungen sollen nach 10 Jahren analysiert und mit Werten vor und unmittelbar nach Beginn der neuen Betriebsweise verglichen werden. Falls nötig sollen dann die betrieblichen Massnahmen angepasst werden. Dieses Vorgehen soll dann in Intervallen von 10 Jahren wiederholt werden.

Rückblickende Diskussion der Vorgehensweise

Die neue Betriebsweise verursacht trotz den Sanierungsmassnahmen ein hohes Schwall-/Sunk-Verhältnis. Aufgrund der sorgfältigen Defizitanalyse und Massnahmendiskussion sowie den nachvollziehbaren ökologischen Zielwerten kann die Sanierung eventuell trotzdem als verhältnismässig und somit gesetzeskonform angesehen werden (GSchG Art. 39a). Da die Kleinwasserkraftwerke in der Schwallstrecke ebenfalls einen bedeutenden Anteil am hohen Schwall/Sunk-Verhältnis haben, sollten diese Kleinwasserkraftwerke in eine ganzheitliche Situationsanalyse der Schwall/Sunk-Beeinträchtigung miteinbezogen werden.

Rückblickend hat sich gezeigt, dass die Kraftwerkeigenschaften, die Eigenschaften der Schwallstrecke (inkl. deren Ökologie) sowie die Rahmenbedingungen sehr spezifisch sind. Es muss angenommen werden, dass dies für die meisten Kraftwerke gilt, was fallspezifische Ausgestaltungen der Untersuchungen, der ökologischen Zielwerte und folglich auch der Sanierungsmassnahmen mit sich zieht.

Als entscheidend für die schnelle und erfolgreiche Planung und Umsetzung der Konzessionserneuerung wurde der frühzeitige Einbezug der verschiedenen Interessensgruppen angesehen. Diese wurden während dem gesamten Planungsprozess durch dieselben Personen vertreten, was sich zusätzlich günstig auf die Effizienz der Entscheidungsfindungen ausgewirkt hat. Diese beiden Punkte waren wichtig für das offene und konstruktive Gesprächsklima in den Planungssitzungen und dafür, dass Einwände und allgemeine Befürchtungen zeitgerecht aufgenommen und angegangen werden konnten. Dadurch konnten Verzögerungen des Verfahrens verhindert werden.

9.2.3 Kraftwerk Lagobianco

Im Rahmen des Ausbaus der Wasserkraftnutzung im Posciavo durch den Konzern RE-POWER wurde in den Neunzigerjahren das Konzessionsprojekt 95 gestartet, welches zu einer Erhöhung der Energieproduktion, aber auch des Schwall/Sunks in der Posciavino geführt hätte. Gegen dieses Projekt legten verschiedene Umweltverbände Einsprachen ein, wodurch das Projekt nach langjährigen Verhandlungen fallengelassen wurde.

Als Alternative wurde in Zusammenarbeit mit den Umweltverbänden und den Gemeinden die Planung des aktuellen Ausbauprojektes angegangen. Dieses beinhaltet neben dem Weiterbetrieb der bestehenden Anlagen ein neues Pumpspeicherwerk mit dem Lago Bianco und dem Lago di Posciavo als Speicherseen, welche durch einen Druckstollen verbunden werden sollen. Der Bau des Pumpspeicherwerks hätte eine Leistungssteigerung um 1 GW zur Folge. Die ökologischen Auswirkungen dieser Erneuerung sind im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung und weiteren ökologischen Abklärungen untersucht worden.

Beschreibung der Kraftwerke und der Schwallstrecke

Mit dem Bau der Kraftwerkzentrale am Ufer des Lago di Posciavo wird der Grossteil des turbinierten Wassers direkt in den See eingeleitet und nicht wie bisher über die Kraftwerkskette mit den Anlagen Cavaglia und Robbia abgearbeitet. Diese Kraftwerkskette ist für den bisherigen Schwall/Sunk in der Posciavino zwischen San Carlo und dem Lago di Posciavo verantwortlich. Mit der neuen Betriebsweise könnte für die verbleibende Kraftwerkskette, die in die Posciavino einleitet, nur der Lago Palü mit einem Volumen von 160'000 m³ als Speichersee genutzt werden, wodurch sich der Schwall/Sunk in der Posciavino gegenüber heute deutlich verringern würden.

Der Lago di Posciavo wird schon durch die bisherige Kraftwerkskette durch Schwall/Sunk beeinflusst, was zu Wasserspiegelschwankungen im See führt. Durch die geplante direkte Einleitung kann sich der Einfluss des eingeleiteten Wassers auf den See jedoch verändern. Die physikalischen Folgen der Einleitung auf den Lago di Posciavo und den Lago Bianco wurden mit Hilfe von numerischen Simulationen durch die Eawag im Rahmen der UVP abgeschätzt (Schmid et al. 2008, Schmid & Wüest 2009, Bonalumi et al. 2012). Diese Simulationen fokussierten auf die Temperaturverhältnisse, die Partikelkonzentrationen, die Strömungen und Schichtungen der Seen unter dem Einfluss des neuen Kraftwerks.

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Posciavino wurden schon seit mehreren Jahrzehnten ausführliche ökologische und hydraulische Untersuchungen durchgeführt. Genaue Informationen über diese Untersuchungen sind jedoch aufgrund des laufenden Konzessionserfahrens nicht erhältlich. Als ökologisches Ziel der Revitalisierungen wird die generelle Wiederherstellung des natürlichen Zustandes der Gewässerökologie angestrebt.

Aufgrund der Resultate der numerischen Modelle für den Lago di Posciavo und den Lago Bianco muss angenommen werden, dass das geplante Pumpspeicherkraftwerk die Temperaturverhältnisse und Trübung in beiden Seen verändern wird (Bonalumi et al. 2012). Durch Reibung und grösserem Temperaturaustausch des Wassers des Lago Bianco führt der Kraftwerksbetrieb im Sommer zu einer Erwärmung des Wassers beider Seen. Im Lago di Posciavo ist sie direkt unterhalb der Sprungschicht am grössten und kann gegen Ende des Sommers bis zu 4°C betragen. Diese Erwärmung hängt von den meteorologischen Bedingungen ab, welche das Verhältnis des Betriebswassers zu jenem des Restwassers aber

auch die Erwärmung des Lago Bianco beeinflussen. Sie ist in trockenen Jahren am grössten. Die veränderten Temperaturverhältnisse haben Auswirkungen auf die Schichtung beider Seen. Es ist zu erwarten, dass sich die Schichtung aufgrund des neuen Kraftwerks im Lago di Posciavo verkürzen und im Lago Bianco verlängern wird. Eine veränderte Schichtung würde unter anderem die Primärproduktion in beiden Seen beeinflussen.

Im Winter ist eine ebenfalls eine Erwärmung des Lago Bianco aufgrund des Pumpspeicherbetriebs zu erwarten, da relativ warmes Tiefenwasser aus dem Lago di Posciavo eingeleitet wird. In der Folge wird voraussichtlich die Eisbildung des Lago Bianco reduziert. Für den Lago di Posciavo haben die Simulationen nur geringe Temperaturveränderungen im Winter ergeben.

Durch den Pumpspeicherbetrieb wird die Partikelkonzentration beider Seen voraussichtlich stark verändert. Ein substantieller Teil der Partikel des Lago Bianco werden aufgrund der geringeren Aufenthaltszeit und in der Folge geringeren Sedimentation in den Lago di Posciavo geschwemmt, wo sie sich unterhalb der Sprungschicht in der Tiefe der Einleitung einschichten.

Die Auswirkungen des Pumpspeicherbetriebs wären nicht nur von den betrieblichen Eigenschaften abhängig, sondern zu einem ähnlich grossen Anteil von den natürlichen Rahmenbedingungen wie den Wind- und Abflussverhältnissen im Einzugsgebiet.

Erkenntnisse für die Sanierungsmassnahmen

Die Auswirkungen der neuen Betriebsweise wurde mit einer Berechnung der neuen Schwall/Sunk-Verhältnisse abgeschätzt. Dabei wurde deutlich, dass sich die Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk in der Posciavino deutlich verringern würde. Die Auswirkungen des Pumpspeicherbetriebs und der Ausgestaltung der Einleitung in den Lago di Posciavo auf beide Seen wurde mit ausführlichen numerischen Modellen untersucht.

Die Ausgestaltung der Revitalisierungsmassnahmen wurde mithilfe von Ökopunkten durchgeführt, wobei die negativen Auswirkungen des Kraftwerkbetriebes den positiven Auswirkungen von Revitalisierungsmassnahmen gegenübergestellt werden konnten. Diese Bilanzierung mit Ökopunkten ermöglichte eine sachliche Diskussion innerhalb der Begleitgruppe über die Umsetzung der Sanierungsmassnahmen.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Durch den Bau der Kraftwerkzentrale am Lago di Posciavo und der direkten Einleitung des Betriebswassers in den See würde der Schwall/Sunk in der Posciavino deutlich reduziert. Ausserdem wird der Schwall/Sunk in ökologisch sensiblen Zeiten (z. B. Laichperiode der Fische) mit betrieblichen Massnahmen zusätzlich verringert.

Die Erkenntnisse aus den Simulationen der Auswirkungen des Pumpspeicherbetriebs auf die Seen führten zum Vorschlag, im Lago di Posciavo das Wasser deutlich unter der Sprungschicht einzuleiten und zu entnehmen. Da der See schon heute Teil der Kraftwerkskette ist, ist er auch aktuell bedeutenden Spiegelschwankungen unterworfen. Aufgrund der Erkenntnisse der gewässerökologischen Untersuchungen werden die Wasserspiegelschwankungen der neuen Betriebsweise auf die gleiche Amplitude beschränkt. Der Pumpbetrieb hätte jedoch deutlich häufigere Schwankungen als im bisherigen Betrieb zur Folge.

Zusätzlich zum Bau der neuen Zentrale wird die Steuerung der Wasserfassungen optimiert, sodass sie neu einen relativen Anteil des jeweiligen Abflusses fassen und so eine

natürlichere Abflussdynamik in der Restwasserstrecke und der Schwallstrecke ermöglichen. Ausserdem sind morphologische und landschaftliche Aufwertungen der Posciavino und des Lago di Posciavo geplant, welche in der Schwallstrecke zu einer Aufweitung des Gewässerraumes und somit zu einer zusätzlichen Dämpfung der Abflussschwankungen führen würden.

Kooperationen bei der Planung der Sanierungsmassnahmen

Das Projekt Lago Bianco wird seit Beginn der Planungen als partizipatives Projekt geführt mit starkem Einbezug der Umweltverbände (WWF, Pro Natura, Greinastiftung, kantonaler Fischereiverband). Dies ist ein entscheidender Aspekt für die vertrauensvolle und konstruktive Stimmung in der Arbeitsgruppe und für die effiziente Planung.

Umsetzung der Sanierungsmassnahmen

Die Planung ist abgeschlossen und momentan befindet sie sich in der Anhörungsphase. Eine Entscheidung durch die kantonalen Behörden wird bis Ende des Jahres 2012 erwartet. Der Betrieb des neuen Kraftwerks soll 2020 aufgenommen werden können.

9.2.4 Kraftwerk Amsteg

Das Kraftwerk Amsteg (KWA) wird von der SBB zur Stromproduktion für den Bahnbetrieb genutzt und wurde ausgebaut, um die maximale Turbiniermenge von 27 auf $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ zu erhöhen. Das ausgebaute Kraftwerk nahm den Betrieb im Jahre 1998 auf und produzierte mit vollständiger Leistung ab dem Jahr 2000. Um die Auswirkungen dieses Ausbaus auf die Schwallstrecke zu verringern, wurde in Amsteg ein Beruhigungsstollen gebaut.

Beschreibung des Kraftwerkes und der Schwallstrecke

Das KWA ist das unterste Kraftwerk der Reusskaskade welches das Wasser aus dem Göschenalpsee und dem Zwischeneinzugsgebiet nutzt. Das genutzte Wasser wird in den Kraftwerken Göschenen, Wassen und Amsteg turbiniert bevor es bei Amsteg wieder in die Reuss zurückgegeben wird. Dadurch ist die Reuss oberhalb der Rückgabe durchgehend eine Restwasserstrecke. Die einzelnen Kraftwerkstufen verfügen jeweils über Beruhigungsbecken, die als Speicher für das unterliegende Kraftwerk dienen und ein ausreichendes Volumen haben, um im Winter das turbinierete Wasser meistens vollständig aufzufangen, sodass es in der Restwasserstrecke nicht zu Schwall/Sunk-Ereignissen kommt. Die Schwallstrecke beschränkt sich somit in der Regel auf den Reussabschnitt von Amsteg bis in den Vierwaldstättersee (Tab. 9.4). Da der Betrieb der Reusskaskade auf die Stromproduktion und nicht auf finanziellen Gewinn (Produktion zu Spitzenzeiten) optimiert wurde, sind die Schwall/Sunk-Effekte meistens geringer als sie bei einer möglichst wirtschaftlichen Ausrichtung des Betriebs wären.

Im Sommer hingegen kann mehr Wasser turbinieret werden, da aufgrund der höheren Niederschläge die den Stausee erreichen, mehr Wasser zur Verfügung steht. Die Menge an turbinieretem Wasser kann dann die Kapazität der Beruhigungsbecken übersteigen. Somit ist Schwall/Sunk in der Restwasserstrecke eher im Sommer ein Problem als im Winter. Das Kraftwerk Wassen gibt das Wasser proportional zur aktuellen Niederschlagsmenge ab. Dadurch sind die Schwall/Sunk-Ereignisse in der unterliegenden Restwasserstrecke meistens geringer als dies bei einer konstanten Rückgabe der Fall wäre.

Tabelle 9.4: Eigenschaften des Kraftwerks Amsteg und der Schwallstrecke.

Eigenschaft	Aktuell (nach Ausbau)
Mittlerer Winterabfluss vor Wasserrückgabe (m ³)	3.4
Einzugsgebietsfläche bei Wasserrückgabe (km ²)	592.8
Vergletscherung des Einzugsgebiets (%)	9.5
Ausbauleistung (MW)	120 (160)
Maximale Turbiniermenge (m ³ s ⁻¹)	50 (65)
Schwall/Sunk-Verhältnis (Winter)	6.5:1 (4.4:1) ^{a)}
Maximale Pegelanstiegsraten (cm min ⁻¹)	2.0
Maximale Pegelrückgangsraten (cm min ⁻¹)	0.7

^{a)}: Ohne Beruhigungsstollen wäre das Schwall/Sunk-Verhältnis 20.5:1

Aufgrund der Ausrichtung der Stromproduktion auf den Bedarf der SBB ergibt sich ein untypisches Abflussregime mit starker Variabilität innerhalb sehr kurzer Zeiträume (< 1 h; Fig. 9.4). Die maximale Menge turbinierten Wassers variiert innerhalb eines Tages deutlich, an einem typischen Wintertag zwischen 10 und 50 m³, wobei die höchsten Werte während den Hauptverkehrszeiten der SBB (6 - 8 h und 17 - 19 h) auftreten.

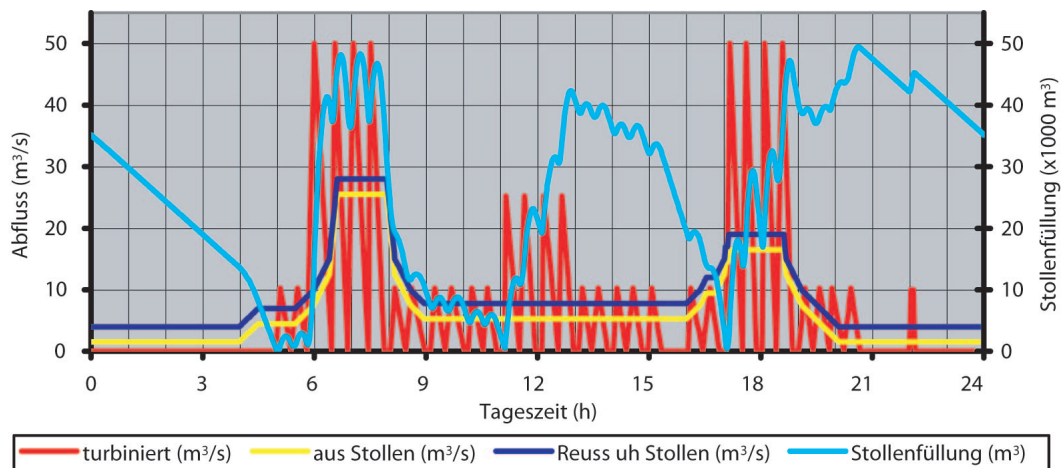


Abbildung 9.4: Simulierte Abflussganglinie an einem durchschnittlichen Wintertag entsprechend den Betriebsvorgaben mit optimierter Regelung des Beruhigungsstollens. Der Vorschwall von ca. einer Stunde vor dem ersten Schwallereignis ist ersichtlich, wodurch das effektive Schwall/Sunk-Verhältnis reduziert werden kann (aus BGF 2009).

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Auswirkungen des Beruhigungsstollens auf die Biota der Schwallstrecke wurde in Schwallversuchen mit verschiedenen Abflussszenarien abgeschätzt (BGF 2009), und die resultierenden Erkenntnisse sind in die Bestimmung der Richtwerte zur Steuerung des Beruhigungsstollens eingeflossen (Werlen 2011). In den Jahren 1996, 1997 und 2000 wurden Schwallversuche mit unterschiedlichen Schwall/Sunk-Verhältnissen (2.25:1, 3.04:1 und 5.6:1) und unterschiedlichen minimalen Abflüssen durchgeführt. Die dabei durchgeführten Untersuchungen fokussierten stark auf die Invertebratendrift und das Stranden und Trockenfallen des Makrozoobenthos und Aufwuchsalgen mit einer sehr hohen taxonomische

Auflösung. Die Wahl dieser Indikatoren (Drift und Stranden) ist eine Folge davon, dass die Schwallstrecke nicht wasserbar ist, wodurch eine Reihe weiterer Indikatoren, wie sie auch in der Vollzugshilfe des BAFU vorgeschlagen wurden (Baumann et al. 2012), nicht erhoben werden konnten. Die während der Defizitanalyse erhobenen Daten wurden dann mit jenen aus der Restwasserstrecke (in Meitschlingen) und der Schwallstrecke während einer Sunkphase, respektive während einer unbeeinflussten Abflussphase, verglichen.

Die Basisdrift (d. h. Invertebratendrift ohne Schwalleinwirkung) unterschied sich nicht zwischen der Restwasser- und der Schwallstrecke und fand vorwiegend am Abend und in der Nacht statt. Unter Schwalleinfluss nahm der Anteil driftender Tiere (im Vergleich zur Gesamtbiomasse im untersuchten Gewässerabschnitt) um bis das Dreissigfache zu. Diese Zunahme ist vom Schwall/Sunk-Verhältnis abhängig, dieses hatte einen deutlich grösseren Einfluss auf die Drift als der Abfluss als solches. Bei einem Schwall/Sunk-Verhältnis unter 5.6:1 war die Drift auch bei hohem Abfluss ähnlich wie in Zeiten ohne Schwalleinfluss. Am meisten Tiere wurden während der Abflusszunahme verdriftet, etwas weniger während der Schwallphase und deutlich weniger während der Abflussabnahme. Zur Drift während der Abflussabnahme wurden jedoch auch die Tiere dazu gerechnet, die sich aus den trockenfallenden Sohlenbereichen zurückziehen. Dieses Muster war bei der Algendrift anders: am meisten Algenbiomasse wurde während dem Schwall verdriftet, etwas weniger bei Schwallanstieg und deutlich weniger bei Schwallrückgang. Die Invertebratendrift nahm mit zunehmender Schwallanstiegsrate deutlich zu, war jedoch von der Schwallrückgangsrate unabhängig.

Die Invertebratendrift war beim ersten Schwall des Tages am grössten und nahm bei kurz aufeinanderfolgenden Schwallereignissen mit jedem zusätzlichen Schwall deutlich ab. Dies rührt wahrscheinlich daher, dass immer weniger sensible Tiere an exponierten Stellen vorhanden waren, da sie schon in vorgängigen Schwällen ausgewaschen wurden oder sich in Refugien (zum Beispiel Substratzwischenräume) zurückgezogen haben. Die Auswirkungen des Erstschwalls auf die Invertebratendrift war abhängig von dessen Schwall/Sunk-Verhältnis und ein Vorschwall konnte die Drift deutlich verringern. Während zunehmender Dauer des hohen Abflusses nahm die Drift ab und war nach etwa 110 Minuten wieder mit der Basisdrift vergleichbar. Ein Vergleich von Driftdichte zu Driftbiomasse der Invertebraten deutet darauf hin, dass in der Schwallstrecke vorwiegend grössere Tiere verdriftet wurden. Dies ist jedoch wahrscheinlich eine Folge von generell grösseren Tieren in der Schwallstrecke, die sich im harschen Habitat der Schwallstrecke besser halten konnten als kleine Tiere (BGF 2009).

Die Korrelation der Invertebratendrift mit jener von Algen und partikulärem Material deutet auf belegt die Bedeutung der passiven Drift. Das Ausmass der passiven Drift unterscheidet sich nach Tierarten, was auf Unterschiede in der Anfälligkeit auf Verdriftung zurückzuführen ist, die in Arteigenschaften wie unter anderen dem Bau und der Grösse der jeweiligen Tiere aber auch deren Habitatspräferenzen begründet ist. Die sensiblen Arten waren entweder vom Habitus wenig resistent oder halten sich vorwiegend im Algenbewuchs auf (Tiere der Orthocladinae), der durch Schwallereignisse ebenfalls beschädigt und verdriftet wird (dominante Algenart war die Goldalge, *Hydrurus foetidus*). So konnte in Flussabschnitten mit starkem Algenbewuchs ein Grenzwert des Abflusses für die sprunghafte Zunahme der Drift nachgewiesen werden. Bei diesem Grenzwert setzte die Abrasion von Algenfäden ein, wodurch auch die Tiere verdriftet wurden, welche die Algen als Habitat nutzten. Daraus resultierte für die meisten sensiblen Arten eine Bestandesauszehrung und somit insdesamt eine Veränderung der Artenzusammensetzung des Markozooenthos. Nach Habitatsansprüchen unterteilt konnte man in der Schwallstrecke eine relative Abnahme

von rheophilen Tierarten und eine relative Zunahme von indifferenten Arten beobachten. Ebenso wurde eine relative Abnahme von Zerkleinerern nachgewiesen.

Das Stranden von Fischen und Makrozoobenthos wurde durch Begehungen der trocken gefallenen Uferstreifen nach einem Schwallereignis untersucht. Dabei wurde eine grosse Anzahl Tiere des Makrozoobenthos aufgefunden, die der zurückweichenden Wasserlinie nicht folgen konnten und verendeten. Anscheinend waren diese Verluste jedoch nicht existenzbedrohend für die Bestände. Das Stranden von Fischen war sehr variabel und abhängig von der Gewässermorphologie, vor allem der Häufigkeit von Senken. Das Stranden von Fischlaich oder -larven kann keine Aussage gemacht werden, da diese Lebensstadien während den Untersuchungszeiträumen nicht vorhanden waren.

Physikochemische Auswirkungen des Kraftwerksbetrieb wurden nur wenige erhoben. Neben dem Abfluss war dies noch die Wassertemperatur, die durch Schwallereignisse nicht entscheidend verändert wurde.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Schon in den ersten Phasen der Planung wurde klar, dass nur ein Beruhigungsstollen als Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahme in Frage kommt. Für ein Beruhigungsbecken konnte nicht genügend Landfläche bereit gestellt werden und eine Ableitung des Schwall in den Vierwaldstättersee würde einen unrealistischen Aufwand mit sich bringen.

Der Beruhigungsstollen (seit 1998 in Betrieb) hat ein Volumen von 50'000 m³ und kann das Schwall/Sunk-Verhältnis in der Regel von 20.5:1 auf 4.4:1 reduzieren. Das Wasser aus dem Beruhigungsstollen kann vor der Rückgabe mit zwei Regulierturbinen zur Stromproduktion genutzt werden kann (ca. 6 GWh/a Stromproduktion). Mit einer optimalen Steuerung des Stollens sollen die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie minimiert werden. Dafür soll der Stollen durch das turbinierte Wasser gefüllt werden und dieses abgegeben werden, wenn die Produktion zurückgefahren wird (vorwiegend in der Nacht), um eine minimale Wasserführung in der Schwallstrecke (4 m s⁻³) zu gewährleisten (Fig. 9.4). Ausserdem ist bei geringem Sunkabfluss (< 10 m³) in der Schwallstrecke während einer Stunde ein Vorschwall vorgesehen, der die Auswirkungen des Erstschwalls verringern kann, wie die Schwallversuche gezeigt haben (BGF 2009). Dadurch kann bei normalem Betrieb des Kraftwerks ein Schwall/Sunk-Verhältnis von < 4:1 eingehalten werden. Bei unvermeidlichen betrieblichen Bedürfnissen ist ein Schwall/Sunk-Verhältnis von 5:1 möglich.

Umsetzung der Sanierungsmassnahme

Im Anschluss an die gewässerökologischen Untersuchungen wurden Modellrechnungen durchgeführt, die dazu dienen sollten, den Betrieb des Kraftwerks und die Steuerung des Beruhigungsstollens zu optimieren (Werlen 2011). Als Richtwerte wurden die ökologisch begründeten Abflussgrenzwerte aus der Defizitanalyse benützt. Mittlerweile ist der Beruhigungsstollen in Betrieb, die Optimierung seiner Steuerung ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Bis zur Umsetzung der neuen Betriebsweise ist vorgesehen, Schwall/Sunk-Effekte durch betriebliche Massnahmen der Kraftwerks zu verringern. Nach Umsetzung der neuen Betriebsweise sollen auch Erfolgskontrollen durchgeführt werden. Falls die festgelegten Schwall/Sunk-Grenzwerte nicht eingehalten werden können, sind ökologische Kompensationsmassnahmen vorgesehen (z. B. Kompensation von Laichflächen).

Rückblickende Diskussion der Vorgehensweise

Der Umweltverträglichkeitsbericht wurde in Kooperation mit den kantonalen Behörden und den Umweltverbänden erarbeitet. Rückblicken lässt sich festhalten, dass die Umweltverbände erst in die Planung einbezogen werden sollten, wenn erste Varianten vorliegen und diskutiert werden können. Die frühe Zusammenarbeit zwischen den Kraftwerksbetreibern und den kantonalen Behörden hingegen ist sehr wichtig, um die Kenntnis der Betreiber von der Betriebsweise und von vorgängigen Untersuchungen in den Planungsprozess der kantonalen Behörden einbinden zu können.

Der Kanton pflegt eine ganzheitliche Perspektive bei der Planung der Sanierungs- und Revitalisierungsbemühungen mit dem Fokus auf das gesamte Einzugsgebiet statt auf einzelnen Kraftwerken oder Fliessgewässerstrecken. So wird die Planung zur Sanierung der gesamten Reusskaskade in den Bereichen Schwall/Sunk, Geschiebetransport und Fischgängigkeit koordiniert durchgeführt. Die zusammengelegte Planung ermöglicht Synergien, u. a. in der Defizitanalyse und erleichtert Diskussionen innerhalb der verschiedenen Stellen des Kantons sowie mit den Kraftwerksbetreibern.

Aus Sicht der kantonalen Behörden ist eine klare und kontinuierliche Zuständigkeit von Vertretern der Interessensgruppen wichtig für eine effiziente Projektorganisation. In diesem Projekt war die Koordination nicht optimal, wodurch einige Projektschritte nur verzögert angegangen wurden und sich insgesamt die Umsetzung des Projekts verlangsamt hat.

Weitere, von den kantonalen Behörden als wichtig erachtete Eigenschaften des Projektes:

- Klare Zuständigkeiten beim Kanton (Fachstellen)
- Klare Zielvorgaben (ökologische, betriebliche, hydraulische)
- Erstellung einer Situationsanalyse mit verschiedenen Varianten und unter Berücksichtigung verschiedener Interessen (Hochwasserschutz, oder weitere Aspekte der Gewässersanierung gemäss GSchG)
- Gleichstellung der Kantone bei der Behandlung durch das BAFU. Dies im Gegensatz zur Restwassersanierung, die in einigen Kantonen mehrfach hinausgezögert wurde.

9.2.5 Kraftwerk am Ijentalerbach

Der Ijentalerbach (Zufluss der Thur bei Nesslau) wird mit einem Kleinwasserkraftwerk energetisch genutzt. Im Rahmen einer Konzessionserneuerung soll der Stauweiher vergrössert und der Betrieb nach ökologischen Gesichtspunkten optimiert werden. Zur Unterstützung der Planung wurden verschiedene hydraulische und gewässerökologische Untersuchungen durchgeführt. Der Stauweiher und die oberen Abschnitte der Restwasserstrecke sind geschützt (Lebensraum für bedrohte Arten (Kerngebiet) respektive Lebensraum Gewässer) oder befinden sich in einem geschützten Gebiet (Flachmoor von nationaler Bedeutung). Die Schwallstrecke und deren Uferbereich unterliegen jedoch keinem besonderen Schutz.

Beschreibung des Kraftwerks und der Schwallstrecke

Das Wasser wird auf 1070 m.ü.M. mit einem Stauweiher gefasst und in die Kraftwerkzentrale (815 m.ü.M., nach ca. 2 km Fliessstrecke) geleitet. Die Schwallstrecke umfasst den and die Zentrale anschliessenden Gewässerabschnitt von ca. 820 m bis zur Mündung in die

Thur. Die Untersuchungen in der Schwallstrecke ergaben eine ausreichende und vielfältige Habitatsverfügbarkeit für Bachforellen und Groppen nach morphologischen Gesichtspunkten. Daher kommt der möglichst natürlichen Gestaltung des Abflussregimes eine grosse Bedeutung zu. Trotz dem Kraftwerksbetrieb weist der Ijentalerbach 10 Mal pro Jahr natürliche Abflussereignisse auf, die den Hochwasserschwelldenwert (Pfaundler et al. 2011) von $0.57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ übersteigen.

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die Defizitanalyse fokussierte auf die Bachforelle und die Groppe aus mehreren Gründen. Diese Fischarten sind wichtige Tiere in der Kommunikation mit anderen Interessengruppen. Ausserdem eignet sich die Bachforelle als Indikatorart für Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerfauna weil ihre Ansprüche auf verschiedene Habitatsparameter (inklusive Morphologie und Abflussbedingungen) relativ gut bekannt sind. Die Auswirkungen des Schwall/Sunks aus dem Ijentalerbach auf die Thur sind aufgrund ihrer Grösse äusserst gering und keine Beeinträchtigung für die Ökologie.

In der Schwallstrecke konnte die Naturverlaichung von Bachforellen nachgewiesen werden, allerdings erschweren Schwellen die Wanderung der Fische aus der Thur in den Ijentalerbach. Die Verfügbarkeit von geeignetem Laichhabitat der Bachforelle war jedoch sehr gering, vorwiegend als Folge zu geringer Wassertiefe bei minimalem Abfluss und relativ starker innerer Kolmation der Kiesschichten. Die Ansprüche der Groppe an die Laichhabitate unterscheiden sich von jenen der Bachforelle. Die Groppe bevorzugt die Unterseite stark umströmter, grösserer Steine als Laichflächen und ist daher weniger empfindlich auf geringe Wassertiefen als die Bachforelle. Sie werden stärker durch geringe Fliessgeschwindigkeiten limitiert, wodurch geeignete Laichflächen erst ab einem Abfluss von $60\text{-}70 \text{ L s}^{-1}$ vorhanden waren.

Das Habitatsangebot für Bachforellenlarven war durch die zu geringen Wassertiefen ebenfalls stark eingeschränkt. Ausreichend geeignete Habitatsflächen waren erst ab einem Abfluss über 200 L s^{-1} verfügbar. Das Habitatsangebot für Groppenlarven wird hingegen vor allem durch die Verfügbarkeit von Kiesflächen der Klassen Mikrolithal und Akal bestimmt, welche ausreichend vorhanden waren.

Die Verfügbarkeit von Juvenilhabitaten der Bachforelle wurde primär durch zu geringe Wassertiefen ($< 0.3 \text{ m}$) eingeschränkt, welche erst ab einem Abfluss von 150 L s^{-1} in ausreichender Fläche zu erwarten sind. Geeignete Habitate für juvenile Groppen waren ebenfalls sehr limitierend, weil sich die relevanten Habitatsparameter (Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe, Substrat) nur selten in geeigneter Ausprägung räumlich überlagerten.

Das Habitatsangebot für adulte Bachforellen wurde vorwiegend durch die zu geringe Wassertiefe und dem sehr geringen Flächenanteil von Kolken und Hinterwasser sowie Deckungsstrukturen eingeschränkt. Ähnlich wie für die juvenilen Groppen war die Habitatsverfügbarkeit für die adulten Groppen sehr gering, weil sich die relevanten Habitatseigenschaften (Fliessgeschwindigkeit, Wassertiefe, Substrat) nur selten in geeigneter Ausprägung überlagerten.

Die Wanderung von Bachforellen, die schon durch die natürlichen Abflussverhältnisse stark eingeschränkt ist, wird durch Schwall/Sunk nicht zusätzlich erschwert, sondern eher auf die Schwallphasen konzentriert. Die Wanderung der Groppe wird durch die künstlichen Abflussverhältnisse nicht eingeschränkt. Die Aufwanderung beider Fischarten sind jedoch aufgrund einer Holzschwelle zusätzlich erschwert.

Mit Hilfe eines zweidimensionalen hydraulischen Modells (Hydro_As-2D) wurden die Auswirkungen von Schwall/Sunk in einem Abschnitt (Länge: 275 m) der Schwallstrecke simuliert. Darauf aufbauend wurden Habitatseigenschaften in den Skalen von Mikrohabitaten (Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit und Substrat), Mesohabitaten (Deckungsstrukturen) und Makrohabitaten (innere Kolmation, äussere Kolmation, Uferbereichsbreite, Uferbewuchs, Wasserspiegelbreite, Kolke) mit einer durchschnittlichen räumlichen Auflösung von 0.33 m^2 erfasst. Diese im Vergleich zum normalen Vorgehen (1 Messpunkt pro m^2) hohe Auflösung war aufgrund der heterogenen Morphologie mit kleinräumigen Unterschieden der Wassertiefe notwendig. Die Berechnung der Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Abflusses wurde für vier verschiedene Abflüsse durchgeführt (20, 50, 85 und 110 L s^{-1}). Die Abschätzung der Habitatseignung des untersuchten Abschnittes wurde dann mittels eines PHABSIM-Ansatzes (Bovee et al. 1998) durchgeführt. Hierfür wurden Präferenzkurven aus der Literatur für verschiedene Lebensstadien der Bachforelle und der Groppe im Bezug auf die relevanten Habitatseigenschaften der oben genannten räumlichen Skalen verwendet.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Mit den Erneuerungen wird der Betrieb des Kraftwerks automatisiert und eine zum natürlichen Abfluss proportionale Wassermenge turbinert. Ausserdem wird bei geringem Abfluss ($< 50 \text{ L s}^{-1}$ bei der Fassung) nicht turbinert. Der Betrieb wird aufgrund von Abflusssimulationen optimiert, mit dem Ziel, das Schwall/Sunk-Verhältnis und das Verhältnis des Schwallabflusses bei Niedrigwasser zum Mittelwasserabfluss möglichst stark zu verringern (Pfaundler et al. 2011). Da bei Niedrigwasser oft nicht turbinert wird, wird während diesen Zeiten (52 % der Messperiode von November 2006 bis Dezember 2008) kein Schwall/Sunk generiert. Während der restlichen Zeit liegt das Schwall/Sunk-Verhältnis mit der neuen Betriebsweise meistens zwischen 2:1 und 3:1 und entspricht somit während 95% der Betriebsstunden der zweitbesten Klasse des entsprechenden Indikators des Hydmod-F (Pfaundler et al. 2011). Diese Änderungen der Betriebsweise hatten eine Produktionseinbusse von ca. 2% zur Folge.

Kooperationen bei der Planung der Sanierungsmassnahmen

Die Ausarbeitung des Pflichtenhefts und der Konzessionsunterlagen wurde mit den kantonalen Behörden während mehreren Sitzungen und Begehungen besprochen. Die Umweltverbände (Pro Natura) wurden erst nach der Erstellung des Pflichtenhefts einbezogen, sie hatten dementsprechend keine Mitsprachemöglichkeit während der Planung der Sanierung. Aufgrund der überwiegend positiven Auswirkungen der Erneuerung auf die Gewässerökologie, erhoben die Umweltverbände keine Einsprachen gegen das Projekt.

Umsetzung der Sanierungsmassnahme

Das Projekt ist genehmigt und wird so umgesetzt.

9.2.6 Revitalisierung des Alpenrhein

Seit mehr als zehn Jahren werden die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf den Alpenrhein von einem Konsortium (die Internationalen Regierungskommission Alpenrhein (IRKA) und die Internationalen Rheinregulierung (IRR)) untersucht. Diese Untersuchungen beziehen sich auf die gesamte Länge des Alpenrheins (vom Zusammenfluss von Vorder-

und Hinterrhein bis zur Mündung in den Bodensee) und zielen auf hydraulische und morphologische Verbesserungen hin. Ein wichtiger Teil der neueren Untersuchungen sind 2D-Habitatssimulationen (Casimir), die für verschiedene Abschnitte mit deutlich unterschiedlicher Morphologie, durchgeführt wurden. Dafür wurden mehrere Organismengruppen (Fische und Makroinvertebraten) sowie verschiedene Entwicklungsstadien der Fische berücksichtigt und unterschiedliche Abflusszenarien simuliert, wie sie mit Sanierungsmassnahmen erreicht werden könnten.

Beschreibung der Kraftwerke und der Schwallstrecke

Im Einzugsgebiet des Alpenrheins befinden sich 40 Stau- und Kraftwerkszentralen die zu einer komplexen hydrologischen Situation im Alpenrhein führen. Verschiedene zum Teil grössere Zuflüsse (Vorder- und Hinterrhein, Landquart, Ill) tragen ausserdem ihren Schwall/Sunk in den Alpenrhein. Daher muss der gesamte Alpenrhein als Schwallstrecke (ca. 93 km) mit variierender Ausprägung von Schwall/Sunk angesehen werden (Tab. 9.5). Die Morphologie des Alpenrhein variiert deutlich mit den relativ natürlichen Mastrilser Auen, dem Abschnitt mit alternierenden Kiesbänken zwischen den Mündungen von Landquart und Ill und der sehr monotonen internationalen Strecke zwischen Ill-Mündung und Bodensee.

Tabelle 9.5: Eigenschaften des Alpenrheins. Die Werte beziehen sich auf die Messstelle bei Domat-Ems.

Eigenschaft	Aktuell
Abfluss Jahresmittel 2002 - 2011 (m^3s^{-1})	106
Einzugsgebietsfläche (km^2)	3229.0
Vergletscherung des Einzugsgebiets (%)	2.3
Schwall/Sunk-Verhältnis	4.7:1 - 7.5:1
Schwallabfluss (m^3s^{-1})	150 - 190
Sunkabfluss (m^3s^{-1})	20 - 40

Die Morphologie des Alpenrheins ist mit Ausnahme der Mastrilser Auen (ca. 2.5 km Länge) sehr verarmt. Zusätzlich verringern zahlreiche künstliche Abstürze die longitudinale Vernetzung des Alpenrheins aber auch die Vernetzung mit den Zuflüssen. Die Kraftwerke führen zu starken Schwall/Sunk-Effekten (Tab. 9.5) und der Umlagerung eines Teils der Sommerabflüsse in den Winter. Ausserdem wurde die Schwebstoffkonzentration gegenüber dem unbelasteten Zustand stark erhöht (auf 40 mg L^{-1})

was zu einer ausgeprägten inneren Kolmation geführt hat.

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Die biologischen Untersuchungen fokussierten auf die Bach- und Seeforellen sowie das Makrozoobenthos. Der gesamte Alpenrhein weist einen stark reduzierten Fischbestand ($< 10\text{ kg ha}^{-1}$) im Vergleich mit unbeeinträchtigten Flüssen des gleichen Typs auf. Auch die Reproduktion vieler Fischarten ist praktisch nicht mehr möglich. Aufgrund der inneren Kolmation sind Laichareale limitierend. Für die Fischlarven der Bach- und Seeforellen ist die Gefährdung durch Stranden und Verdriftung während Schwall/Sunk-Ereignissen entscheidend, da sie nur über geringe Schwimmkapazität verfügen. Die Gefährdung durch diese Faktoren ist im Frühjahr am Grössten und nimmt im Jahresverlauf ab. Während dem Winter ist aufgrund der Habitatsverfügbarkeit die Gefahr des Strandens für Fische deutlich grösser als die Gefahr des Verdriftens, dies weil die Gewässermorphologie mehr Habitate aufweist, in denen die Gefahr des Strandens hoch ist, gegenüber solchen mit hoher Gefahr des Verdriftens. Das Aufwandern von adulten Seeforellen wird durch Schwall/Sunk ebenfalls beeinträchtigt. Telemetrie-Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Tiere an den

Wochenenden mit geringeren Schwall/Sunk-Einfluss deutlich grössere Distanzen (+ 50%) zurücklegen als an Wochentagen (Mendez 2007). Die gleiche Studie konnte auch deutlich grössere Wanderdistanzen der Seeforellen während der Nacht nachweisen.

Erkenntnisse für die Sanierungsmassnahmen

Die ökologischen und morphologischen Untersuchungen haben den Unterschied zwischen den verschiedenen Abschnitten des Alpenrhein deutlich aufgezeigt. Da diese Unterschiede vor allem auf der morphologischen Vielfalt beruhen, sind sie auch nur schwach durch die Abflussbedingungen beeinflusst und mit Schwall/Sunk-Sanierungen zu verbessern. Wenn die Morphologie günstiger ist, zeigt sich jedoch der Effekt von Abflussschwankungen auf die Eignung der vorhandenen Habitats deutlich. Diese Erkenntnisse belegen, dass sich die Morphologie und die Abflussverhältnisse gegenseitig beeinflussen in ihrem Einfluss auf die Habitatsverfügbarkeit für Gewässerorganismen.

Es zeigte sich ausserdem, dass die Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen sorgfältig auf die Zielorganismen angepasst werden müssen. Der erhöhte Sunkabfluss im Rahmen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen kann sich in einigen Fällen negativ auf die Jungfische auswirken, die natürlicherweise an Niedrigwasserbedingungen im Winter angepasst sind. Eine Möglichkeit, negative Auswirkungen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen zu verringern, liegt in der angepassten Steuerung der Abflussschwankung (z. B. Steuerung eines Beruhigungsbeckens) entsprechend der Empfindlichkeit der verschiedenen Organismengruppen und/oder Lebensstadien, welche sich im Jahresverlauf deutlich ändern kann. Eine variable Steuerung sollte ohne zusätzliche Einschränkungen für die Kraftwerke möglich sein und könnte gegebenenfalls Möglichkeiten für den Betrieb der Kraftwerke schaffen.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Im Rahmen eines Folgeprojektes der („D5 - Optimierung von Beruhigungsbecken zur Minderung von Schwall und Sunk am Alpenrhein“) wird die Planung von Beruhigungsbecken angestrebt. Dieses Projekt wurde jedoch noch nicht begonnen.

9.2.7 Revitalisierung des Ticino

Das Ökosystem des Ticino ist entlang einem grossen Teil seiner Fliessstrecke durch die Wasserkraftnutzung und Begradigungen stark eingeschränkt und naturfern. Als Reaktion auf eine Initiative der Fischereiverbände strebt die kantonale Verwaltung eine umfassende Sanierung und ökologische Aufwertung des Ticino an. Dabei ist die Sanierung der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf die Gewässerökologie des Ticino und seiner Seitengewässer ein zentraler Teil dieser Bemühungen. Aufgrund dieser Eigenschaften wird die übergeordnete Planung der Sanierungen von der kantonalen Verwaltung und nicht einzelner Kraftwerkbetreibern durchgeführt, daher liegt auch der Fokus der Sanierungen auf der Aufwertung des gesamten Flusssystemes.

Beschreibung der Kraftwerke und der Schwallstrecke

Der Ticino lässt sich hydrologisch grob in zwei Abschnitte unterteilen: oberhalb des Kraftwerks Nuova Biaschina der AET in Pollegio ist der Ticino eine Restwasserstrecke mit Ausnahme einer Fliessstrecke von ca. 20 km von der Quelle bis Airolo und ca. 5.5 km nach dem Kraftwerk Stalvedro (s. auch Frutiger 2004). Die wichtigsten schwallverursachenden

Kraftwerke sind Nuova Bascina (AET) und Biasca (OFIBLE). Ausserdem sind die Zuflüsse Moesa und Morrobia schwallbelastet. Ab dem Kraftwerk Nuova Bascina beginnt die Schwallstrecke, die sich wiederum in fünf Abschnitte unterteilen lässt, aufgrund des Einflusses verschiedener Zuflüsse (DRIFT 2011): bis zur Mündung vom Brenno, bis zur Einleitung des Kraftwerks Biasca, bis zur Mündung der Moesa, bis nach Gudo und bis in den Lago Maggiore (Fig. 9.5).

Auswirkungen von Schwall/Sunk

Zur Abschätzung der Auswirkungen von Schwall/Sunk (und weiterer Einflussfaktoren) auf die Gewässerökologie wurden umfangreiche Untersuchungen in allen Abschnitten des Ticino durchgeführt. Da keine geeigneten Referenzgewässer identifiziert werden konnten, mussten die Resultate der Defizitanalyse mit Werten aus der Literatur verglichen werden.

Die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Hydrologie unterschied sich stark zwischen den untersuchten Abschnitten. In den Wintern 2008/2009 und 2009/2010 war das Schwall/Sunk-Verhältnis im ersten Abschnitt (direkt unterhalb der Einleitung des Kraftwerks Nuova Bascina) am grössten (durchschnittlich 25.4:1), im zweiten Abschnitt 6.9, im dritten Abschnitt 4.2 und in den Abschnitten 4 und 5 jeweils 2.6. Die Pegelzunahmeraten nahmen tendenziell ebenfalls im Flussverlauf ab, waren aber im zweiten Abschnitt am grössten (30.3 cm h^{-1}) und im fünften Abschnitt am kleinsten (16.6 cm h^{-1}). Die Pegelabnahmeraten folgten den gleichen relativen Muster: höchste Werte (-19.9 cm h^{-1}) im Abschnitt 2 und -8.4 cm h^{-1} im Abschnitt 5.

Die Morphologie unterscheidet sich grundsätzlich stark in den verschiedenen Abschnitten. Abschnitt 3 weist die vielfältigste Gewässermorphologie auf, Abschnitt 5 ist hingegen vorwiegend kanalisiert und morphologisch monoton. Der morphologische Zustand der anderen Abschnitte liegt dazwischen. Ein bedeutendes Problem für die Vielfalt an verfügbaren Habitaten ist neben der Kanalisierung die geringe Anbindung der kleineren Zuflüsse, welche oft schon vor der Einmündung in den Ticino trockenfallen.

Die Einleitung von turbiniertem Wasser führt meistens zu einer Abkühlung des Flusswassers, da die Temperatur des Ticino auch im Winter oft über $4 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Mit zunehmender Fliessstrecke nimmt dieser Effekt ab, wodurch insgesamt die mittlere tägliche Temperaturvariabilität relativ gering ist. Die Wasserqualität scheint durch den Schwallbetrieb nicht beeinträchtigt zu sein. Auch Substratbewegungen scheinen durch den Kraftwerksbetrieb nicht bedeutend zugenommen zu haben. Innere Kolmation ist in der Schwallstrecke zwar verbreitet, allerdings nicht allzu ausgeprägt.

Die Fischgemeinschaft wird durch die Bachforelle (vorwiegend im Oberlauf) und die Groppe (vorwiegend in den unteren Abschnitten) dominiert. Alle Lebensphasen der Fische sind durch ein oder mehrere Schwallindikatoren beeinträchtigt, allerdings unterschiedlich stark in den verschiedenen Flussabschnitten. In den letzten Abschnitten war wahrscheinlich die verarmte Morphologie die stärkere Einschränkung für die Fische (und die anderen Gewässerorganismen) als die hydrologische Beeinträchtigung. Die Artenvielfalt der Fische ist etwas unter dem Wert vergleichbarer Gewässer. Die Vielfalt der Makroinvertebratenfamilien ist mittel bis gut (11.5 bis 14.3 Punkte auf der IBGN-Skalierung). Allerdings kann die Drift bei Schwall zu grossen Verlusten der Biomasse führen (v. a. bei einem Schwall/Sunk-Verhältnis $> 6.5:1$ und einer Pegelanstiegsrate $> 2 \text{ cm min}^{-1}$).

Mit einem eindimensionalen, hydraulischen Modell (HEC-Ras) wurden verschiedene Abflussparameter abgeschätzt. Damit konnten Aussagen über die Veränderung von Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit und benetzte Breite gemacht werden. Für detailliertere Aussagen über die Verfügbarkeit von Habitaten müssten zweidimensionale Modelle verwendet



Abbildung 9.5: Schwallstrecke Ticino (aus DRIFT 2011). Tratto = Abschnitt.

werden, die jedoch einen viel grösseren Aufwand mit sich bringen. Solche Berechnungen wurden bis zum aktuellen Stand des Projekts noch nicht gemacht. Die durchgeführten Abschätzungen haben jedoch gezeigt, dass für eine Vergrößerung des Habitatangebots primär der minimale Abfluss erhöht werden müsste.

Beschreibung der Sanierungsmassnahmen

Es wurden noch keine Sanierungsmassnahmen ausgewählt. Zum aktuellen Stand der Planung wurden 20 Möglichkeiten zur Sanierung vorgeschlagen (DRIFT 2011). Diese Vorschläge umfassen Beruhigungsbecken bei Pollegio und bei Iragna, verschiedene gewässer-morphologische Massnahmen (im Ticino und den Seitenbächen) sowie verschiedene betriebliche Massnahmen. Viele Informationen für die Umsetzung der Massnahmen fehlen jedoch noch. Die mangelnde Verfügbarkeit von Land wird die Auswahl und Dimensionierung von Sanierungsmassnahmen aber sicherlich stark einschränken.

Eine gewisse Schwallreduktion oberhalb des Kraftwerks Nuova Biascina könnte durch Beruhigungsbecken für die Kraftwerke Ritom und Stalvedro erreicht werden, die zur Zeit in Planung sind. Wie stark sich diese Beruhigungsbecken auf den Betrieb des Kraftwerks Nuova Biascina und auf die unterhalb liegende Schwallstrecke auswirken wird, ist noch unbekannt.

Kooperationen bei der Planung der Massnahmen

Die Kooperation in der bisherigen Planungsphase war gut, mit Einbezug der kantonalen Stellen, der Fischereiverbände sowie der Umweltverbände (Pro Natura). Das gute Gesprächsklima basiert stark auf persönlichen Kontakten zwischen den Verbänden und den kantonalen Stellen und ist entscheidend für eine möglichst effiziente Diskussion und Planung.

Umsetzung der Massnahme

Die Planung der Sanierungsmassnahmen ist noch nicht weit fortgeschritten und basiert zum jetzigen Zeitpunkt auf groben Vorschlägen, die als Grundlage für entsprechende Diskussionen dienen können. Die Priorisierung der Massnahmen basiert auf einer Abschätzung ihrer Wirkung. Die Hindernisse bei der Umsetzung und daher die Wahrscheinlichkeit einer Realisierung in der vorgeschlagenen Form wurden noch nicht vertieft abgeklärt und in die Planung zum aktuellen Stand einbezogen. Vor allem die Verfügbarkeit von Land für die vorgeschlagenen Beruhigungsbecken in Pollegio (AET Nuovo Biascina) und Iragna (OFIBLE Biasca) scheint unwahrscheinlich. Die Ausarbeitung der Sanierungsmassnahmen wird in einer neuen Arbeitsgruppe durchgeführt, die Ende 2011 ins Leben gerufen wurde (Leitung Hr. L. Filippini, Kt. Ti).

Rückblickende Diskussion der Vorgehensweise

Verschiedene Umweltbüros haben die Hydraulik, die Fische und Makroinvertebraten in den fünf Abschnitten der Schwallstrecke untersucht. Die Auswahl der Umweltbüros und die Auftragserteilung wahr zum Teil problematisch.

Auch unterschiedliche Interessen der verschiedenen kantonalen Stellen haben teilweise die Verhandlungen und die Definierung des Zielzustandes erschwert. Dies zum Beispiel wegen den unterschiedlichen und teilweise widersprüchlichen Vorgaben des Gewässerschutzgesetzes und des Energiegesetzes.

Die Vollzugshilfe des BAFU für die erste Planungsphase (Baumann et al. 2012) ist hilfreich. Sie könnte jedoch den Aufwand für klare Fälle von Schwall/Sunk-verursachenden Kraftwerken noch geringer vorschlagen. Der für diese Fälle vorgesehene Schnelltest stellt aus Sicht von B. Polli, Kt. Tessin immer noch einen zu grossen Aufwand dar, der zu zusätzlichen Verzögerungen führen könnte.