Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen

Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht

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

Zusammenfassung

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

1. Einleitung

Am 1. Januar 2011 ist das revidierte Gewässerschutzgesetz und am 1. Juni 2011 die entsprechende Verordnung in Kraft getreten. Sie enthalten neue Vorgaben zur Sanierung von wesentlichen Beeinträchtigungen der einheimischen Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume durch Schwall und Sunk (Art. 39a und 83a GSchG; Art. 41e,f und Anhang 4a GSchV). Der Vollzug sieht einen Planungsprozess mit zwei Phasen vor (vgl. Bruder et al. 2012).

Während in der ersten Phase die betroffenen Flussstrecken und Kraftwerke identifiziert werden, sollen in der zweiten Phase die Sanierungsplanung durch die Kraftwerkbetreiber ausgearbeitet und verschiedene Massnahmen basierend auf einer Aufwand/Wirkungsanalyse bewertet werden. Die Finanzierung der Massnahmen zur Sanierung der Beeinträchtigung der Fliessgewässer durch die Wasserkraftnutzung (neben der Sanierung von Schwall und Sunk auch jene des Geschiebehaushalts und der Fischwanderung) soll über einen Zuschlag auf die Übertragungskosten der Hochspannungsnetze von 0.1 Rp./kWh geschehen (Art. 15b EnG) [1]. Eine grosse Herausforderung bei der Aufwand/Wirkungsanalyse besteht darin, die Auswirkungen einer Massnahme auf die Gewässerökologie zu prognostizieren.

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

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

2. Vorgehen und Fallstudien

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

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

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

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

Mit dem Ziel, die ersten Erkenntnisse aus dieser Analyse wissenschaftlich zu diskutieren und weiter zu entwickeln, wurde ein internationaler Expertenworkshop durchgeführt. Die anwesenden Experten vereinten unterschiedliche Fachbereiche (Ökologie, Hydraulik, Modellierung) und Erfahrungen aus den meisten Ländern, in denen die Schwall/Sunk-Problematik relevant ist und die Sanierung zur Zeit angegangen wird [2].

3. Ansätze zur Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen

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

3.1 Schwallversuche

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

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

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

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

zoobenthos.

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

3.2 Physikalische Modelle

Physikalische Modelle von Sanierungsmassnahmen *(Bild 1)* oder Schwallstrecken (z.B. Versuchsrinnen[3]) eignen sich zur gezielten Untersuchung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf kleinräumige Eigenschaften und Prozesse in der Schwallstrecke. Solche Untersuchungen umfassen beispielsweise die Wirkung von Elementen der Gewässermorphologie auf die Hydraulik oder das Stranden von Tieren während Schwallereignissen. Physikalische Modelle eignen sich aber in der Regel nicht für die Abbildung von komplexen und grossskaligen Prozessen in der Schwallstrecke (Sedimentdynamik, Interaktionen der Organismen, usw.).

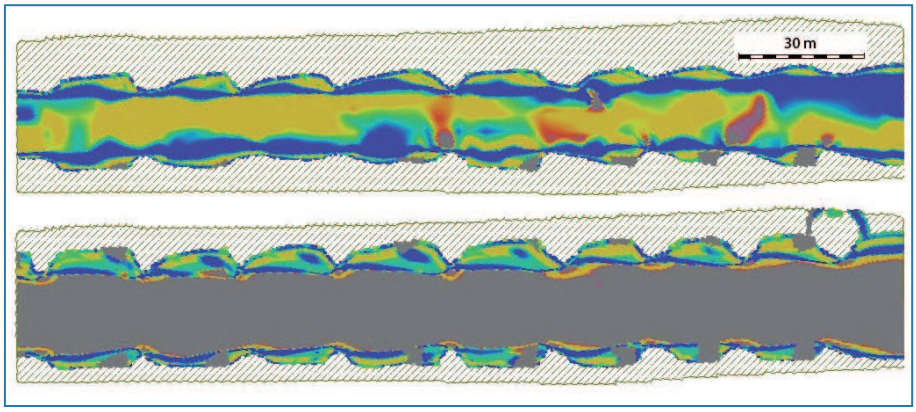

Bild 2. Beispielhafte Darstellung der Habitateignung einer Buhnenstrecke für Fliessgewässerorganismen mit dem Habitatmodell CASiMiR bei tiefem (oben) und hohem (unten) Abfluss. Die Habitateignung nimmt von grau über rot, gelb, grün und blau zu. Folgende hydromorphologische Eigenschaften wurden berücksichtigt: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

3.3 Numerische Modelle

Mit numerischen Modellen können die Auswirkungen der Abflussbedingungen auf die Hydraulik und das Sedimentregime der Schwallstrecke simuliert werden. Dabei ist je nach morphologischer Vielfalt der Schwallstrecke die Anwendung von eindimensionalen (mit Querprofilen) oder zweidimensionalen (mit Rasterelementen) Modellen notwendig. Die Resultate der hydraulischen Modelle können mit Hilfe von Habitatmodellen (z.B. CASiMiR; *Bild 2*) zur quantitativen Abschätzung der Habitateignung (Einbezug von Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit, Korngrösse, usw.) und deren Veränderung für verschiedene Organismengruppen oder -arten verwendet werden (Zurwerra und Bur 2009, IRKA 2012). Die Verlässlichkeit der Aussagen solcher Modelle hängt von der Qualität der zugrundeliegenden Daten ab (Morphologie der Schwallstrecke, Habitatansprüche der Organismen usw.). Diese

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

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

3.4 Kombination von Prognostizierungsansätzen

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

4. Indikatoren zur Prognostizierung der Auswirkung von Sanierungsmassnahmen

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

4.1 Notwendigkeit unterschiedlicher Indikatorensets

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

4.2 Indikatorenset für die Bewertung von Sanierungsmassnahmen

Für eine umfassende Beschreibung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf das Ökosystem muss das Indikatorenset die unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk sowie die verschiedenen Ökosystemkomponenten der Schwallstrecke abdecken. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Fallbeispielen, der Literatur und Diskussionen mit Experten wurden Indikatoren ausgewählt und während dem Expertenworkshop (vgl. Kapitel 2) bezüglich ihrer Sensibilität auf Schwall und Sunk sowie ihrer Prognostizierbarkeit mit verfügbaren Methoden bewertet. Die Indikatoren, welche in beiden Kriterien hohe Werte erzielten, wurden anschliessend in einer Matrix zu einem Indikatorenset zusammengestellt *(Tabelle 2)*. In dieser Matrix werden folgende typischen hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk unterschieden (vgl. Bruder et al. 2012):

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

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

4.2.1 Indikatoren zur Prognostizierung der Hydromorphologie, Wassertemperatur und Trübung

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

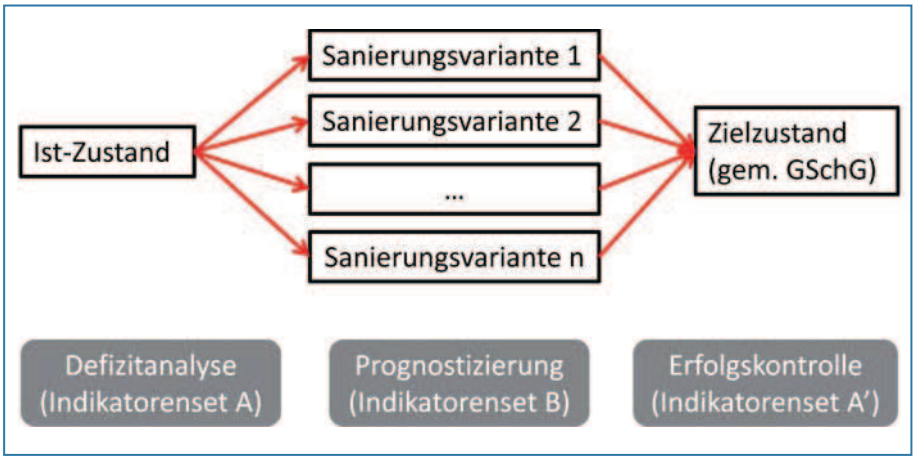

Bild 3. Schematische Darstellung der Aufgaben der unterschiedlichen Indikatorensets. Für die Defizitanalyse und die Erfolgskontrolle sollten die gleichen oder ähnliche Indikatorensets verwendet werden, für die Prognostizierung sind z.T. andere Indikatoren notwendig.

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

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

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

drologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk verwendet werden.

4.2.2 Indikatoren zur Prognostizierung der Habitatentwicklung

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

4.2.3 Indikatoren zur Prognostizierung der Entwicklung wichtiger Organismengruppen

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

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

5. Weitere Erkenntnisse für die Planung von Massnahmen

5.1 Die Bedeutung des räumlichen und zeitlichen Kontexts

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

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

5.2 Die Bedeutung der Morphologie

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

5.3 Koordination mit anderen Revitalisierungs- und Renaturierungsbestrebungen

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

5.4 Die Bedeutung von Erfolgskontrollen

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

5.5 Die Bedeutung von partizipativen Verfahren

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

6. Offene Forschungsfragen

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

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

6.1 Prognostizierung des Sedimentregimes

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

6.2 Prognostizierung der Diversität und der Biomasse von Fischen und Makroinvertebraten

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

6.3 Stranden und Verdriften von Fischen und Makroinvertebraten

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

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

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

6.5 Auswertung von Sanierungs- und Forschungsprojekten

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

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass eine gründliche und umfangreiche Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen eine entscheidende Grundlage für die Auswahl und Planung der Massnahmen ist. Die Auswirkungen auf die Gewässerökologie sind komplex und ihre Prognostizierung daher ambitiös. Für die Prognostizierung stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, über deren Anwendung schon gewisse Erfahrungen bestehen. Die zugrundeliegenden gewässerökologischen Untersuchungen sind mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden, wenn sie aussagekräftige Resultate liefern sollen. Dieser Aufwand richtet sich auch nach der Komplexität des Kraftwerksystems in einem Einzugsgebiet und der Schwallstrecke. Da die Prognostizierung aber die Grundlage für die Auswahl und Dimensionierung der Sanierungsmassnahmen bietet, kommt ihr eine entscheidende Bedeutung für die Planung zu. Dies und die Grösse der Sanierungsprojekte (bzgl. Landbedarf, Bauten, usw.) und die damit verbundenen Kosten und Schwierigkeiten, diese Massnahmen nachträglich anzupassen, rechtfertigen bereits in der Planungsphase einen dementsprechend grossen Aufwand. Breit angelegte Forschungsprojekte zum Thema Schwall und Sunk werden zusätzliche wichtige Erkenntnisse liefern, insbesondere wenn die Sanierungsprojekte eng von Experten begleitet werden. Damit dürfte sich künftig auch die Genauigkeit der Prognostizierungen und der Erkenntnisgewinn aus den Sanierungsprojekten weiter erhöhen lassen.

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

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei folgenden Personen für Diskussionen und Auskünfte bedanken. Aus dem Projektteam: M. Kummer, I. Schmidli, M. Huber-Gysi (alle BAFU), A. Wüest und A. Peter (beide Eawag) sowie P. Baumann (posthum). Ausserdem bei den Teilnehmern des Expertenworkshops: T. H. Bakken (SINTEF, Norwegen), D. Courret (IMFT, Frankreich), J. H. Halleraker (DIRNAT, Norwegen), Dr. C. Hauer (BOKU, Österreich), Prof. Dr. K. Jorde (ENTEC), Dr. B. Maiolini (IASMA, Italien), Dr. A. Melcher (BOKU, Österreich), Dr. P. Parasiewicz (S. Sakowicz Institut für Binnenfischerei, Polen), Dr. U. Pulg (Universität Bergen, Norwegen), Prof. Dr. A. Schleiss (EPFL), Dr. M. Schneider (Schneider & Jorde Ecological Engineering, Deutschland), J. Schnell (Landesfischereiverband Bayern, Deutschland), Dr. A. Siviglia und Dr. G. Zolezzi (beide Universität Trento, Italien). Sowie für Auskünfte im Zusammenhang mit den Fallstudien: Dr. B. Polli (Büro für Jagd und Fischerei, Kt. Tessin), L. Jaun (Amt für Umwelt, Kt. Uri), Dr. N. Semadeni (Axpo), R. Mendez (Axpo), J. Grünenfelder (Ecowert), J. Ortlepp (Hydra), F. Binder (FMB

Engineering) und W. Dönni (Fischwerk) sowie D. Tanno (eawag) für die CASiMiR-Darstellung.

Literatur

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

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

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

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

Limnex (2006). Schwallversuche in der Linth. Ökologische Auswirkungen von schwalldämpfenden Massnahmen. Bericht z. H. Amt für Umweltschutz, Kanton Glarus. 95 S.

Limnex (2009). Schwall/Sunk in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchungen von Hasliaare und Lütschine. Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht z. H. KWO. 41 S.

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

Nagrodski, A., G. D. Raby, C. T. Hasler, M. K. Taylor und *S. J. Cooke* (2012). Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation. Journal of Environmental Management 103, 133–141.

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

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

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

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

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

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

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

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

Anschrift der Verfasser

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

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

Steffen Schweizer, KWO AG
Grimselstrasse, CH-3862 Innertkirchen

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

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

terra vermessungen

Unsere **Referenz** – Rundum **zufriedene Kunden**

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

HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERUNG