Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 109 (2017)
Heft: 2

Artikel: Schwall und Sunk : erste Erfahrungen zur Defizit- und Ursachenanalyse
Autor: Caduff, Ursin / Semadeni, Nadia / Custa, Michel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941611

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schwall und Sunk – Erste Erfahrungen zur Defizit- und Ursachenanalyse

Ursin Caduff, Nadia Semadeni, Michel Cuska

Zusammenfassung

Die Axpo Power AG (Axpo) ist mit mehreren Kraftwerksanlagen stark von der Schwall/Sunk-Sanierung betroffen und hat die vorgeschlagene Methodik der Vollzugshilfe «Schwall-Sunk – Massnahmen» des BAFU bereits in unterschiedlichen Einzugsgebieten angewendet. Exemplarisch werden anhand des Beispiels des Vorder-, Hinter- und Alpenrheins die ersten Erfahrungen des Umweltteams der Axpo erläutert.

Die Untersuchungen der Defizit- und Ursachenanalyse wurden vorerst auf die vier grossen Kraftwerksgesellschaften beschränkt, welche die Gewässerstrecken des Vorder- und Hinterrheins beeinträchtigen. Die Vollzugshilfe «Schwall-Sunk – Massnahmen» sieht für diese Untersuchungen vermehrt Schwall/Sunk-sensitive und -prognostizierbare Indikatoren vor. Eine grosse Herausforderung stellen dabei die Anforderungen an die korrekte Modellierung von Schwall/Sunk-Abflüssen seitens der Ökologie dar. Hierzu wurde ein umfangreiches hydraulisches 2D-Modelle erstellt und die Prognosefähigkeit anhand von Feldaufnahmen validiert.

1. Einleitung

Wasserkraftwerke, die infolge ihrer marktorientierten Produktion in Gewässern eine wesentliche Schwall/Sunk-Beeinträchtigung hervorrufen, sind gemäss Art. 39a Gewässerschutzgesetz (GSchG) dazu verpflichtet, ihre Kraftwerksanlagen bis ins Jahr 2030 zu sanieren.

In einer ersten Phase (strategische Planung) haben die Kantone bis Ende 2014 die Verursacher einer wesentlichen Schwall/Sunk-Beeinträchtigung identifiziert und diese in einem Bericht zuhanden des Bundesamts für Umwelt (BAFU) festgehalten. Im Verlauf des Jahres 2015 wurden die Berichte zur strategischen Planung der Kantone durch das BAFU geprüft, mit den Kantonen besprochen und schlussendlich genehmigt.

Gleichzeitig erarbeitete das BAFU eine Vollzughilfe für die zweite Phase der Schwall/Sunk-Sanierung, die Planung der Sanierungsmassnahmen durch die Inhaber der Kraftwerksanlagen. Der Entwurf für die Anhörung der Vollzugshilfe «Schwall-Sunk-Massnahmen» (VZH-Massnahmen) wurde im Februar 2016 publiziert (*Tonolla et al.* 2016). Dieser Entwurf zeigt auf, welches Vorgehen und welche ökologischen Untersuchungen die Inhaber von Wasserkraftwerken für die Planung von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen anwenden sollen sowie welche Nachweise und Unterlagen sie einreichen müssen.

Nach verfügter Sanierungspflicht ist als erster Schritt die Durchführung einer Defizit- und Ursachenanalyse vorgesehen. Der Entwurf der VZH-Massnahmen sieht hierzu verschiedene mess- oder berechenbare Grössen (Indikatoren) zur Bewertung des Gewässerzustandes vor (*Tonolla et al.* 2016). Im Vergleich zur Methodik aus der strategischen Planung (*Baumann et al.* 2012), sollen für die Defizit- und Ursachenanalyse vermehrt Schwall/Sunk-sensitive und -prognostizierbare Indikatoren verwendet werden.

Axpo ist mit mehreren Kraftwerksanlagen von der Schwall/Sunk-Sanierung betroffen. Das Ressort Umwelt/Wasserwirtschaft der Axpo Hydroenergie, nachfolgend als Umweltteam der Axpo bezeichnet, hat die vorgeschlagene Methodik der VZH-Massnahmen bereits in unterschiedlichen Einzugsgebieten angewendet und dadurch erste Erfahrungen mit der Durchführung einer Defizit- und Ursachenanalyse gesammelt. Anhand des Beispiels des Vorder-, Hinter- und Alpenrheins, eines grossen und komplexen Einzugsgebiets mit mehreren Schwallverursachern, werden erste Erkenntnisse aus den getätigten Untersuchungen erläutert, das methodische und fachliche Vorgehen des Umweltteams der Axpo aufgezeigt sowie die verschiedenen Schwierigkeiten und Herausforderungen angesprochen.

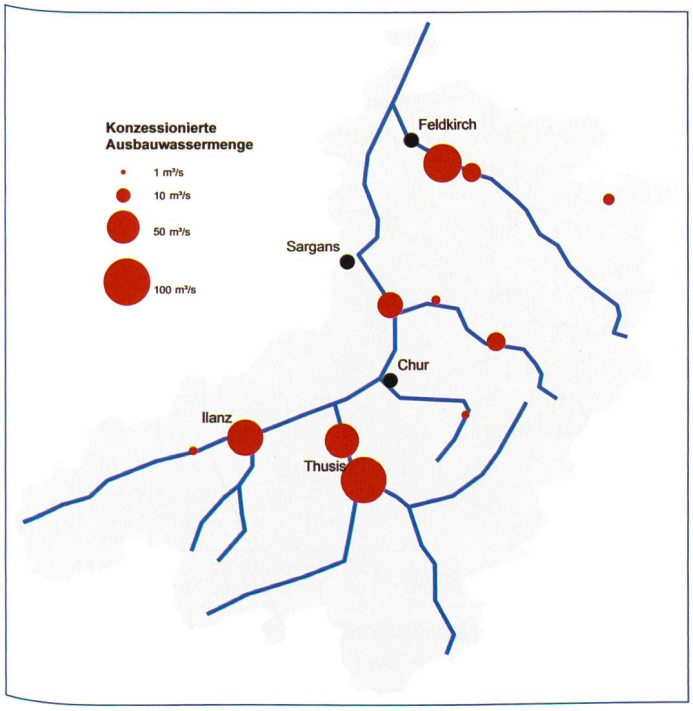

Bild 1. Schwallverursachende Zentralen im Einzugsgebiet des Alpenrheins. Dargestellt ist die konzessionierte Betriebswassermenge [m³/s]. Die zwei Kraftwerkszentralen in Sils im Domleschg und die zwei in Rothenbrunnen sind aus Platzgründen zusammengefasst (Quelle Grundlagendaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

2. Ausgangslage und methodisches Vorgehen

Grundsätzlich ist eine Schwall/Sunk-Sanierung mit der Bestimmung der schwallbedingten Defizite und den daraus folgenden Sanierungszielen und Massnahmen immer eine sehr komplexe Fragestellung. In einem

grossen Einzugsgebiet wie dem des Vorder-, Hinter- und Alpenrheins erhöht sich jedoch die Komplexität der Fragestellung infolge der Vielzahl an Einflussfaktoren nochmals deutlich. Wie nachfolgend erläutert, versucht das Umweltteam der Axpo mit einer zeitlichen und räumlichen Etappierung der Untersuchungen sowie durch die Verwendung geeigneter Werkezeuge die Schwall/Sunk-Sanierung zu bewältigen.

2.1 Kraftwerksnutzung – Schwallverursacher

Das Abflussregime des Alpenrheins und vieler seiner Zuflüsse ist stark durch den Betrieb einer Vielzahl von Kraftwerksanlagen beeinflusst *(Bild 1)*. So befinden sich im Einzugsgebiet des Alpenrheins über 20 Speicherseen und grössere Ausgleichsbecken mit einem gesamten Speichervolumen von ca. 770 Mio. m^3 (*Schaller* 1993). Durch diese Vielzahl an sehr unterschiedlichen und mehr oder weniger über das ganze Einzugsgebiet verteilten Schwallverursachern gestaltet sich die Sanierung von Schwall/Sunk als äusserst komplexe Aufgabe.

Die betroffenen Kraftwerksgesellschaften werden jeweils mit einer individuellen, werksspezifischen Verfügung zur Sanierung der durch ihre Anlagen verursachten wesentlichen Beeinträchtigung verpflichtet. Die im Gewässer vorgefundenen Schwall/Sunk-Beeinträchtigungen sind jedoch eine Kombination der einzelnen Einflüsse aller Schwallverursacher im Einzugsgebiet. Es ist äusserst herausfordernd, die vorgefundenen Defizite eindeutig den einzelnen Schwallverursachern zuzuordnen und für jede Kraftwerksgesellschaft konkrete Sanierungsziele und schlussendlich Sanierungsmassnahmen zu definieren.

Die Abhängigkeiten der verschiedenen Schwallverursacher untereinander sind nicht über das ganze Einzugsgebiet gleich und stark vom Standort der schwallverursachenden Zentrale im Einzugsgebiet wie auch von der Grösse der Kraftwerksanlagen abhängig. Das Umweltteam der Axpo empfiehlt daher, die Planungsarbeiten und Untersuchungen der verschiedenen Schwall/Sunk-Sanierungen zu etappieren.

Für sehr kleine Kraftwerksgesellschaften im oberen Bereich des Einzugsgebiets (z. B. Kraftwerke Frisal AG in Tavanasa) oder an Seitenzuflüssen (z. B. Kraftwerk Litzirüti – Arosaenergie) sind die Abhängigkeiten zu den anderen Kraftwerksgesellschaften eher klein. Es wurde daher angenommen, dass diese Schwall/Sunk-Sanierungen als Einzelfall betrachtet und somit unabhängig von den anderen Kraftwerken im Einzugsgebiet gelöst werden können. Kraftwerksgesellschaften, welche die Wasserrückgabe weit unten im Einzugsgebiet des Alpenrheins haben (z. B. Kraftwerke Sarganserland AG in Sarelli) sind hingegen bei der Planung der Sanierungsmassnahmen sehr stark von den oberliegenden Kraftwerksgesellschaften abhängig. Diese Schwall/Sunk-Sanierungen sind vorzugsweise erst im Nachgang zu den Sanierungen der massegebenden Oberlieger anzugehen.

Etwa 80 % des Anteils der Ausbauwassermengen im schweizerischen Teil des Einzugsgebiets des Alpenrheins konzentrieren sich auf fünf Wasserrückgaben von vier Kraftwerksgesellschaften am Vorder- und Hinterrhein (Kraftwerke Hinterrhein AG, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, Kraftwerke Zervreila AG, Kraftwerke Ilanz AG). Die Schwall/Sunk-Beeinträchtigungen dieser vier grossen Kraftwerksgesellschaften überlagern und beeinflussen sich gegenseitig stark und sind auch für die weitere Strecke des Alpenrheins sehr entscheidend. Die Arbeiten für die Sanierung dieser Anlagen sollten daher prioritär angegangen werden und müssen gut koordiniert werden.

2.2 Räumliche Komponente

Die Schwall/Sunk-beeinträchtigte Strecke des Alpenrheins und seiner Zuflüsse ist sehr lang. So beträgt z. B. die Fliessstrecke des Vorder- und Alpenrheins zwischen Ilanz und dem Bodensee ca. 115 km. Eine Schwallwelle benötigt für diese Strecke in etwa einen halben Tag. Aufgrund sich überlagernder Schwallwellen der verschiedenen Kraftwerkszentralen, der sich ändernden Morphologie, der natürlichen Retention wie auch aufgrund des natürlicherweise flussabwärts zunehmenden Abflusses ändert sich die Charakteristik einer Schwallwelle ab Ilanz bis in den Bodensee sehr stark *(Bild 2)*. Die verschiedenen Kennwerte einer Schwallwelle wie z. B. Form und Amplitude, Zeitpunkt und Dauer oder die Änderungsraten können je nach Betrachtungspunkt im Einzugsgebiet erheblich differieren.

Grundsätzlich ist somit die ganze Strecke des Vorderrheins ab Ilanz, des Hinterrheins ab Sils im Domleschg und des Alpenrheins ab Reichenau bis in den Bodensee durch Schwall/Sunk der erwähnten Kraftwerksgesellschafften betroffen. Die Durchführung einer Defizit- und Ursachenanalyse über die ganze Länge des Einzugsgebiets ist aufgrund der hohen Komplexität und der verschiedenen zu berücksichtigenden Einflussfaktoren eine grosse Herausforderung. Das Umweltteam der Axpo empfiehlt daher, vorerst die unmittelbar beeinträchtigten Strecken des Vorderrheins zwischen Ilanz und Reichenau und des Hinterrheins zwischen Sils im Domleschg und Reichenau separat zu untersuchen. Eine Abstimmung zwischen dem Vorder- und Hinterrhein sowie mit dem Alpenrhein erfolgt erst in einem zweiten Schritt. Dies unter der Annahme, dass, wenn die gesetzlichen Vorgaben am Vorder- und Hinterrhein eingehalten werden können, die Vorgaben – für die untersuchten Kraftwerke am Vorder- und Hinterrhein – auch für den Alpenrhein eingehalten sein sollten.

Trotz dieser Etappierung der Untersuchungen bzw. Eingrenzung des Untersuchungsgebiets ist die Fragestellung der Schwall/Sunk-Sanierung von Vorder- und Hinterrhein sowie in einem zweiten Schritt des Alpenrheins weiterhin sehr komplex. Für die Durchführung der Defizit- und Ursachenanalyse wie auch für die Planung von Sanierungsmassnahmen in diesem Einzugsgebiet ist es daher wichtig, geeignete Werkzeuge zur Verfügung zu haben. Nur so kann die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Schwallwellen der betroffenen Kraftwerksanlagen am Vorder- und Hinterrhein untersucht, verstanden und der Einfluss bzw. die Wirkung von allfälligen Sanierungsmassnahmen an unterschiedlichen Punkten im Einzugsgebiet abgeschätzt werden.

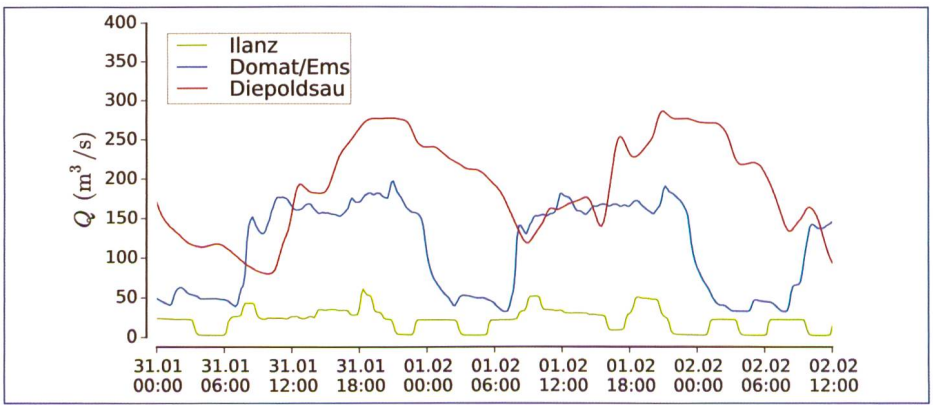

Bild 2. Schwall/Sunk-Ganglinie an den drei BAFU-Messstellen in Ilanz, Domat/Ems und Diepoldsau für den Zeitraum vom 31. Januar 2011 bis 2. Februar 2011 (Quelle hydrologische Daten: Bundesamt für Umwelt BAFU).

2.3 Morphologische Komponente

Die gewässerökologischen Beeinträchtigungen durch Schwall/Sunk werden massgeblich auch durch die Morphologie eines Gewässers beeinflusst. So unterscheiden sich die Schwall/Sunk-Auswirkungen in einem kanalisierten deutlich von denen in einem naturnahen Gewässerabschnitt. Grundsätzlich sind die ökologischen Verhältnisse in naturnahen Gewässerabschnitten auch unter Einfluss von Schwall/Sunk besser (*Kindle* 2012). Eine naturnahe Morphologie kann jedoch auch die Schwall/Sunk-Beeinträchtigungen verschärfen (*Baumann* 2003).

Die schwallbeeinträchtigten Strecken des Vorder-, Hinter- und Alpenrheins sind hinsichtlich ihrer Morphologie sehr heterogen. So finden sich in den Schwallstrecken des Vorder- und Hinterrheins wie auch auf dem Abschnitt der Aue Mastrils am Alpenrhein verschiedene naturnahe Flussabschnitte. Die Strecke zwischen der Mündung der Landquart und der Ill kann der Morphologie der alternierenden Bänke zugeordnet werden, und in der internationalen Strecke des Alpenrheins sowie im oberen Abschnitt der Schwallstrecke des Hinterrheins ist das Gewässer stark kanalisiert *(Bild 3)*. Der heutige morphologische Zustand der betroffenen Gewässer ist zudem nicht unveränderlich. So sind bereits heute im Einzugsgebiet des Alpenrheins verschiedenen Revitalisierungsprojekte geplant (z. B. Rhesi, Alpenrhein Maienfeld usw.).

Aus heutiger Sicht ist noch nicht bekannt, welche Gewässerabschnitte für die Auslegung des ökologischen Sanierungsbedarfs entscheidend sein werden. Bei den weiteren Untersuchungen und für die Planung von Sanierungsmassnahmen müssen daher unterschiedliche Gewässermorphologien berücksichtigt werden.

Durch morphologische Änderungen im Einzugsgebiet ändern sich auch die Auswirkungen und damit die Anforderungen an die Sanierung von Schwall/Sunk. Um mit dieser Herausforderung umgehen zu können, werden wiederum geeignete und insbesondere auch flexible Werkzeuge benötigt.

2.4 Politische Komponente

Zuletzt gilt es zu beachten, dass mit der Schwall/Sunk-Sanierung im Einzugsgebiet des Vorder-, Hinter- und Alpenrheins drei Länder (Schweiz, Lichtenstein und Österreich), in der Schweiz zwei Kantone und natürlich eine Vielzahl an Gemeinden betroffen sind. Dadurch gilt es, verschiedene Gesetzgebungen und Interessen zu beachten und in der Planung zu berücksichtigen. Weiter gilt es auch zu erwähnen, dass am Alpenrhein durch die Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA) bereits sehr viele Untersuchungen hinsichtlich der Schwall/Sunk-Problematik durchgeführt wurden und durch die verschiedenen Studien auch schon gewisse Zielvorstellungen vorhanden sind (z. B. *Kindle* 2012).

3. Fachliches Vorgehen

In einem ersten Schritt der Defizit- und Ursachenanalyse geht es vor allem darum, die Schwall/Sunk-Problematik und deren Auswirkungen auf das Einzugsgebiet des Vorder- und Hinterrheins im Detail ökologisch zu untersuchen.

Die Untersuchungen orientieren sich dabei am Entwurf der VZH-Massnahmen (*Tonolla et al.* 2016). Die unterschiedlichen Indikatoren dieser Vollzugshilfe sind in vier Gruppen eingeteilt: Kernindikatoren, Schwall/Sunk-sensitive Indikatoren, Breitbandindikatoren und Zusatzindikatoren. Die Untersuchung bzw. Bewertung aller Indikatoren der VZH-Massnahmen wird seitens des Umweltteams der Axpo als sehr aufwendig und nicht zielführend beurteilt. So beschreiben die Breitband- und Zusatzindikatoren eher den allgemeinen Zustand des Gewässers. Vorgefundene Defizite lassen sich nicht eindeutig einer Ursache zuordnen. Für die Defizit- und Ursachenanalyse des Vorder- und Hinterrheins werden daher vorerst eine Auswahl der Kern- und Schwall/Sunk-sensitiven Indikatoren untersucht. Dieses Vorgehen wie auch das detaillierte Untersuchungsprogramm inkl. der vorgesehenen Untersuchungsstrecken wurde mit den Bündner Behörden abgesprochen und in Form eines Pflichtenhefts festgehalten.

3.1 Hydraulische Modellierungen

Die Beurteilung verschiedener Indikatoren der VZH-Massnahmen ist ohne Hilfe von hydraulischen Modellen gar nicht möglich (*Tonolla et al.* 2016). Für die Durchführung einer Defizit- und Ursachenanalyse ist die Erstellung eines hydraulischen Modells daher unumgänglich.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Hochwasserberechnungen, an denen die Gerinne z. T. bis über die Kapazitätsgrenze belastet werden und somit grosse Abflusstiefen vorweisen, sind für die Betrachtung der Schwall/Sunk-Aufgabenstellungen auch die korrekte Abbildung von Niederwasserzuständen (Sunk-Phase) erforderlich. Zudem werden vonseiten der Ökologie sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Abbildung bzw. Prognose von Schwall/Sunk-Abflüssen und damit an die hydraulischen Modellierungen gestellt.

So müssen für die Auswertung der für die Beurteilung der wesentlichen Beeinträchtigung entscheidenden Kernindikatoren an verschiedenen, z. T. grossräumig verteilten Untersuchungsstandorten präzise Aussagen zu den Abflussverhältnissen (z. B. Pegeländerungsraten, benetzte Breite, Wassertiefen usw.) gemacht werden können.

Nach dem Prüfen der verschiedenen Möglichkeiten und Methoden für die Modellierung bzw. Prognose von Schwall/Sunk-Abflüssen, immer unter Berücksichtigung der hohen Anforderungen seitens der Ökologie, wurde entschieden, ein flächendeckendes, feinaufgelöstes, numerisches, hydraulisches 2D-Modell zu erstellen. Nur so kann das Umweltteam der Axpo gewährleisten, dass eine möglichst realitätsnahe Abbildung der relevanten Abflüsse auch in morphologisch natürlichen Gewässerabschnitten möglich ist und die geforderten Aussagen in der benötigten Genauigkeit vorliegen. Durch die flächendeckende 2D-Modellierung ist es zudem möglich, an beliebigen Standorten im modellierten Gewässerabschnitt präzise Aussagen

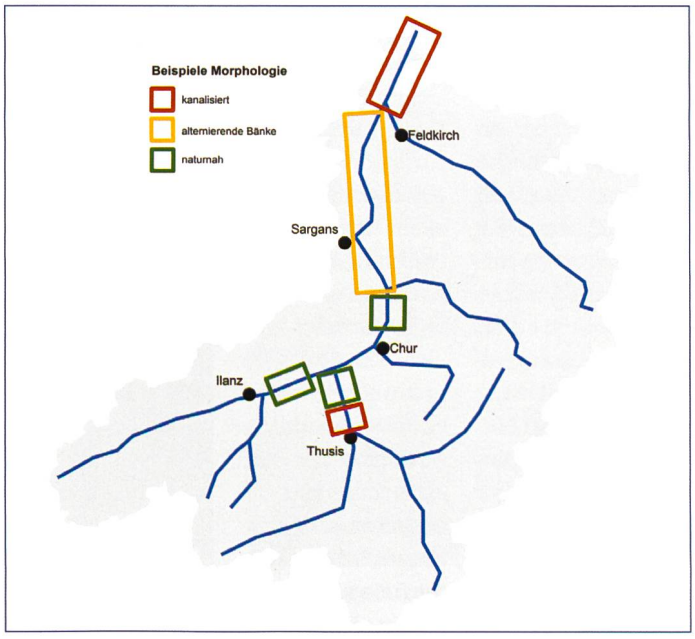

Bild 3. Schematische Darstellung der unterschiedlichen Morphologien im Einzugsgebiet des Alpenrheins (Quelle Grundlagendaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

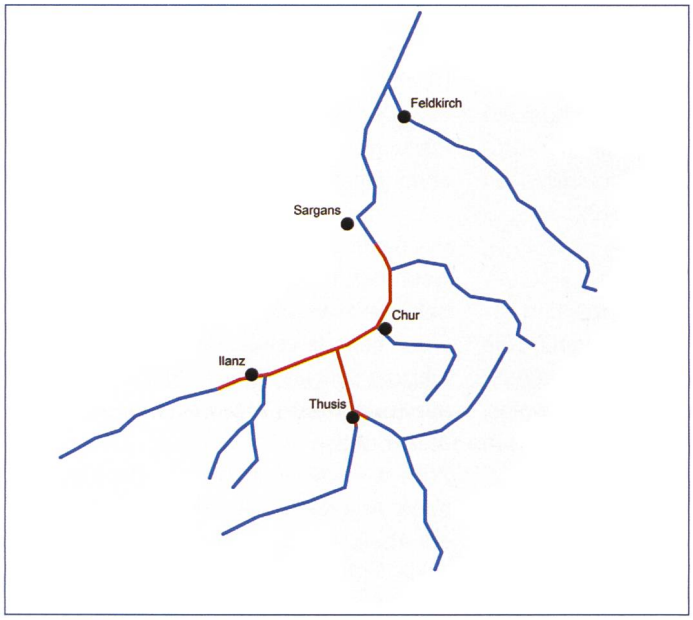

Bild 4. Perimeter hydraulisches 2D-Modell (Quelle Grundlagendaten: Bundesamt für Landestopografie swisstopo)

zu den Schwall/Sunk-Abflüssen zu machen. Dies ermöglicht eine sehr hohe Flexibilität hinsichtlich der ökologischen Untersuchungen. In einem komplexen Einzugsgebiet wie dem des Vorder-, Hinter- wie auch des Alpenrheins, in dem die für die Sanierung schlussendlich entscheidenden Abschnitte nicht bereits a priori bekannt sind, ist dies ein wichtiger Vorteil.

3.2 Modellerstellung

Vorerst wurde das hydraulische 2D-Modell für die Flussstrecke von Tavanasa am Vorderrhein und von Sils am Hinterrhein bzw. an der Albula hinunter bis auf Höhe der Wasserrückgabe der Kraftwerke Sarganserland nahe Bad Ragaz am Alpenrhein erstellt *(Bild 4)*. Das hydraulische 2D-Modell deckt dadurch eine Fliessstrecke von ca. 75 km des Vorder-, Hinter und Alpenrheins ab.

Seit einigen Jahren kann man mit hochenergetischen Lasern nicht nur die Geländeoberfläche, sondern auch die Gewässersohle in einigen Metern Tiefe vermessen. Für die Modellierung von Schwall/Sunk-Abflüssen sind genau diese bathymetrischen Informationen sehr wichtig. Im Dezember 2014 erfolgte daher die topografische Datenerfassung mittels einer solchen bathymetrischen Flugaufnahme. Besonders tiefe Stellen, wie z. B. der Stauraum des Kraftwerks Reichenau, mussten konventionell mittels Echolot befahren werden. Der mittlere Fehler in der Höhe liegt innerhalb des Modells bei 4 cm.

Aus der Befliegung resultierte eine sehr grosse Datenmenge. Gesamthaft wurden über 500 Mio. Datenpunkte erhoben. Für die Erstellung des Rechennetzes des hydraulischen Modells musste diese Datenmenge stark ausgedünnt werden. Vorerst galt es, die ganzen, für die Modellierung des Gewässers nicht relevanten, jedoch durch die Befliegung trotzdem erfassten Daten zu entfernen. Weiter wurden die Datenpunkte des so übrig gebliebenen Flussschlauchs mit einer intelligenten Ausdünnung ohne grossen Genauigkeitsverlust von ca. 12 Punkte/m^2 auf 10 Punkte/m^2 bis 0.4 Punkte/m^2 reduziert. Mit den restlichen ca. 20. Mio. Datenpunkten wurde das Rechennetz erstellt.

3.3 Schwall/Sunk-Versuche

Trotz der hohen Genauigkeit des erstellten hydraulischen Modells wurden auch die Schwall/Sunk-Prozesse in Natura vor Ort untersucht. Es ist sehr wichtig, die Beurteilung der einzelnen Indikatoren nicht einzig auf die hydraulischen Modellierungen abzustützen, sondern Letztere auf ihre Prognosefähigkeit hin zu überprüfen. Die Modellergebnisse wurden daher anhand von Feldversuchen validiert. Hierzu wurden im Winter 2016 am Vorder- und Hinterrhein Schwallversuche durchgeführt und die wichtigsten Parameter im Feld erhoben.

Für die erwähnten Versuche wurde in Zusammenarbeit mit den betroffenen Kraftwerksgesellschaften ein genau vorgegebenes Betriebsprogramm erstellt, an welches sich die jeweiligen Kraftwerkszentralen zu halten hatten. Da die Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet in den Wintermonaten klein sind und dadurch auch die hydrologischen Unsicherheiten klein sind, konnten so sehr spezifische Schwall/Sunk-Abflüsse vor Ort untersucht werden (*Bilder 5* und *6*). An verschiedenen Standorten in den jeweiligen Schwallstrecken des Vorder- und Hinterrheins wurden unterschiedliche Messungen durchgeführt. Mittels der jeweiligen Sonden wurden die Pegel- und Temperaturänderungen sowie die Wassertrübung erfasst. In ausgewählten, aufgrund der morphologischen Gegebenheiten als ökologisch kritisch und daher massgebend eingestuften Untersuchungsstrecken wurden zudem die benetzten Breiten bei verschiedenen Schwallabflüssen und bei Sunk erhoben.

Um die benetzten Breiten in den erwähnten Untersuchungsstrecken eines breiten Gewässers flächendeckend zu erheben, wurde ein Multikopter eingesetzt. Die damit erhobenen Bilder wurden fotogrammetrisch ausgewertet und daraus georeferenzierte Orthofotos erstellt. Diese Orthofotos konnten schlussendlich in einem Geoinformationssystem (GIS) hinsichtlich benetzter Fläche ausgewertet werden.

Bereits die Orthofotos, als Beispiel hier Aufnahmen der Untersuchungstrecke

Bild 5. Sunkabfluss in der Aue Cauma am Vorderrhein auf Höhe Castrisch von ca. 7 m^3/s am 14. März 2016.

Bild 6. Schwallabfluss in der Aue Cauma am Vorderrhein auf Höhe Castrisch von ca. 60 m^3/s am 15. März 2016.

in der nationalen Aue Cauma am Vorderhein auf der Höhe von Castrisch bei einem Sunkabfluss von ca. 7 m^3/s *(Bild 7)* und einem Schwallabfluss von ungefähr 60 m^3/s (*Bild 8*), zeigen eindrücklich, wie gross die Schwall/Sunk-Auswirkungen in einem Flussabschnitt mit natürlicher Morphologie sein können. Im betrachteten Beispiel nimmt die benetzte Fläche zwischen Sunk und Schwall um fast 40 % zu.

3.4 Modellvalidierung

Für den Zeitraum der Schwallversuche standen für alle Kraftwerkszentralen hoch aufgelöste Abflussdaten (1–3 min Zeitintervall) zur Verfügung und die wichtigsten, für den Sunk relevanten Zuflüsse werden kontinuierlich durch BAFU-Messstellen (10-min-Mittelwert) erhoben. Anhand dieser Grundlagen konnten die Schwallversuche im hydraulischen 2D-Modell nachgebildet und die Ergebnisse mit den Feldaufnahmen verglichen werden.

Im Modell wurde die ganze Woche der Schwallversuche am Vorderrhein ab Mittag des 14. März bis zum 20. März 2016 nachgebildet. Die eigentlichen Feldaufnahmen fanden dann am 15. März 2016 statt. Anhand der BAFU-Messstelle in Ilanz konnte die korrekte Wiedergabe der Abflussverhältnisse durch das Modell überprüft werden *(Bild 9)*.

Die zeitlichen Rechenschritte des Modells sind sehr klein und die Informationen zum Abfluss stehen in einer sehr hohen zeitlichen Auflösung zur Verfügung. Die Abflusswerte der BAFU-Messstelle werden hingegen als 10-min-Mittelwerte erfasst. Für den hier dargestellten Vergleich dieser zwei Ganglinien wurden daher auch die modellierten Werte jeweils über 10 Minuten gemittelt. Ausser geringfügigen Unterschieden in der Höhe der Abflüsse stimmen die modellierte und die gemessene Ganglinie sehr gut überein. Insbesondere das Eintreffen der verschiedenen Schwallwellen kann über die ganze modellierte Woche sehr genau prognostiziert werden.

Ein Vergleich der benetzten Flächen konnte unter anderem für die Untersuchungstrecke in der nationalen Aue Cauma auf der Höhe von Castrisch durchgeführt werden, (Vgl. *Bilder 7* mit *10* und *Bilder 8* mit *11*). Trotz der sehr hohen Genauigkeit des hier vorgestellten hydraulischen Modells bleibt es ein Abbild der Wirklichkeit. So sind z. B. Verdunstungs- und Versickerungsprozess wie auch der Austausch mit dem Grundwasser im hydraulischen Modell nicht berücksichtigt. Rein optisch sind lokal kleinere Unterschiede auszumachen. Es gilt dabei auch zu beachten, dass zwischen den

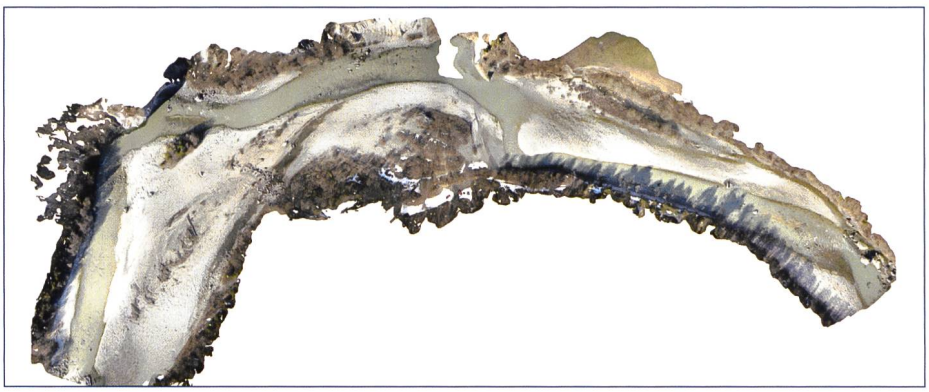

Bild 7. Orthofoto der Untersuchungstrecke in der Aue Cauma am Vorderrhein auf Höhe Castrisch bei Sunkabfluss von ca. 7 m^3/s am 14. März 2016.

Bild 8. Orthofoto der Untersuchungstreck in der Aue Cauma am Vorderrhein auf Höhe Castrisch bei Schwallabfluss von ca. 60 m^3/s am 15. März 2016.

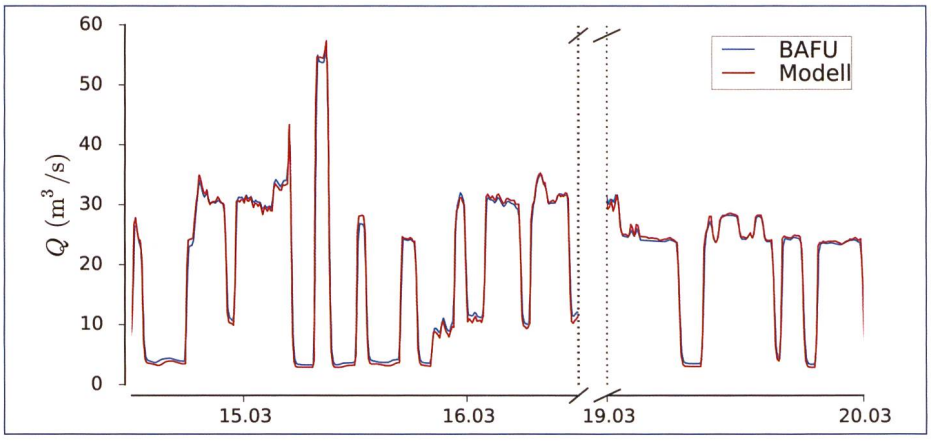

Bild 9. Vergleich des gemessenen und modellierten Abflusses am Querschnitt der BAFU-Messstelle Ilanz. Ausschnitt des modellierten Zeitraums vom 14. März 2016 ab Mittag bis 20. März 2016 (Quelle hydrologische Daten: Bundesamt für Umwelt BAFU).

bathimetrischen Flugaufnahmen (Dezember 2014) für die Erhebung der Topografie für das 2D-Modell und den Aufnahmen der Schwallversuche (Februar bis März 2016) mehr als ein Jahr liegt. Grundsätzlich werden jedoch auch die benetzten Flächen bei Schwall wie auch bei Sunk durch das hydraulische Modell sehr gut wiedergegeben und decken sich mit den im Feld erhobenen Orthofotos. So werden z. B. auch kleine, nur bei Schwall benetzte Nebenarme im Modell gut wiedergegeben.

Aufgrund der sehr hohen Qualität der topografischen Grundlagen und deren Implementierung im Modell werden auch kleinräumige Hindernisse und die daraus folgenden Abflussbedingungen relativ gut abgebildet (*Bilder 12* und *13*). Um den Anforderungen der Methodik aus der VZH-Massnahmen gerecht zu werden, ist gerade die korrekte Wiedergabe solch kleinräumiger Abflussbedingungen wichtig (z. B. Beurteilung des Indikators F3* «Laichareale der Fische»).

Mit den vergleichenden Aufnahmen an den Schwallversuchen konnte die Prognosefähigkeit des hydraulischen Modells nachgewiesen werden. Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, welches für die Untersuchung des grossräumigen Zu-

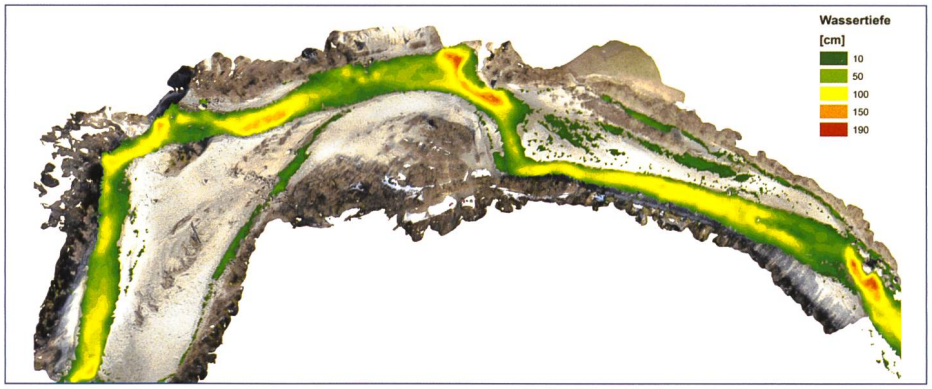

Bild 10. Orthofoto des Sunkabflusses überlagert mit dem im Modell nachgebildeten Sunkabfluss von ca. 7 m3/s am 14. März 2016 in der Untersuchungsstrecke der Aue Cauma auf Höhe Castrisch.

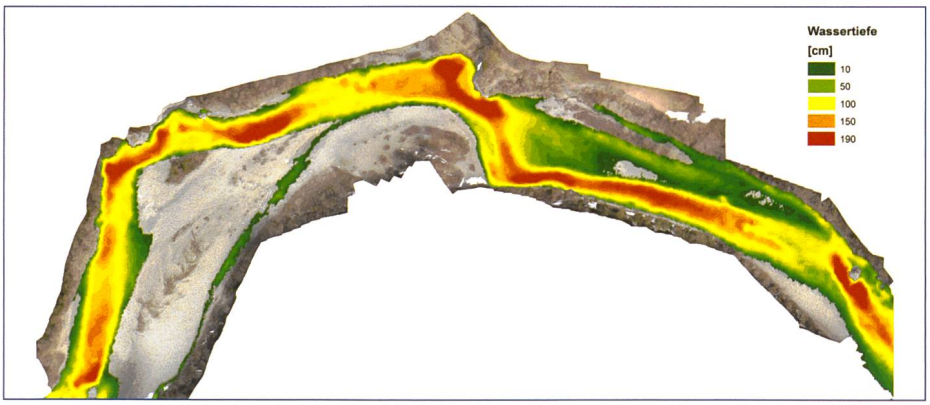

Bild 11. Orthofoto des Schwallabflusses überlagert mit dem im Modell nachgebildeten Schwallabfluss von ca. 60 m3/s am 15. März 2016 in der Untersuchungsstrecke der Aue Cauma auf Höhe Castrisch.

Bild 12. Detailausschnitt des Orthofotos des Sunkabflusses von ca. 7 m³/s am 14. März 2016 in der Untersuchungsstrecke der Aue Cauma auf Höhe Castrisch.

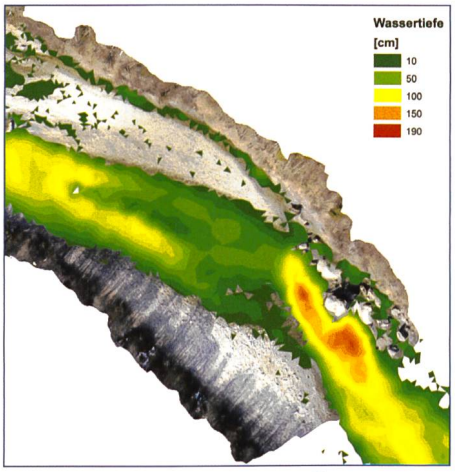

Bild 13. Detailausschnitt der Überlagerung des Orthofotos und des im Modell nachgebildeten Sunkabflusses von ca. 7 m3/s am 14. März 2016 in der Untersuchungsstrecke der Aue Cauma auf Höhe Castrisch.

sammenspiels und den Auswirkungen verschiedener Schwallwellen gut geeignet ist. Zudem können auch zukünftige Szenarien hinsichtlich Morphologie, Kraftwerksbetrieb oder betreffend der Wirkung von Sanierungsmassnahmen untersucht werden.

4. Fazit

Anhand einer Erfolgskontrolle werden die Kraftwerksgesellschaften nach Umsetzung der Sanierungsmassnahmen deren ökologische Wirkung nachweisen müssen. Die in der Planungsphase erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen für die Dimensionierung der Sanierungsmassnahmen müssen daher eine möglichst hohe Aussagekraft haben. Hierzu sind die heute zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten zu nutzen. Gerade in sehr komplexen Einzugsgebieten hat sich das Vorgehen mit einer flächendeckenden und feinaufgelösten 2D-Modelllierung bewährt.

Wie mehrmals erwähnt, ist die Durchführung einer aussagekräftigen Defizit- und Ursachenanalyse fachlich sehr anspruchsvoll. In grossen und komplexen Einzugsgebieten bestehen neben den fachlichen jedoch weitere grosse Herausforderungen. Eine Koordination der verschiedenen Schwall/Sunk-Sanierungen ist bereits früh unerlässlich. Inwiefern es jedoch gelingen wird, die Interessen aller Akteure über das ganze Einzugsgebiet zusammenzubringen, wird sich in der Zukunft zeigen.

Literatur

Baumann, P., Klaus, I. (2003). Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes. Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei Nr. 75, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1–112 (www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/04851/index.html?lang=de).

Baumann, P., Kirchhofer, A., Schälchli, U. (2012). Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203: 126 S.

Kindle, H., Wendlinger, C., Frangez, C., Baumann, P., Schneider M. (2012). Alpenrhein. Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile. Kurzbericht. Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA). Amt für Umweltschutz FL, Postfach 684, FL 9490 Vaduz.

Schaller, K. (1993). Der Einfluss der Stauseen auf Rhein und Bodensee. IRR (1993), pp. 328–330.

Tonolla, D., Chaix, O., Meile, T., Zurwerra, A., Büsser, P., Oppliger, S., Essyad, K. (2016). Schwall-Sunk – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. X: X S.

Anschrift der Verfasser

Ursin Caduff, Nadia Semadeni, Michel Cuska
Axpo Power AG,
Parkstrasse 23, CH-5401 Baden
ursin.caduff@axpo.com
nadia.semadeni@axpo.com
michel.cuska@axpo.com