Charakterisierung und Veränderungen von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz : eine hydrologische Datenanalyse

Autor(en): **Pfaundler, Martin / Keusen, Mario**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **99 (2007)**

Heft 1

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940108

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Charakterisierung und Veränderungen von Schwall-Sunk-Phänomenen in der Schweiz

Eine hydrologische Datenanalyse

■ Martin Pfaundler, Mario Keusen

Zusammenfassung

Eine am Bundesamt für Umwelt (BAFU) durchgeführte Studie überprüfte mittels einer hydrologischen Datenanalyse die Hypothese, dass sich Schwall-Sunk-Phänomene in den letzten 20 bis 30 Jahren in der Schweiz verändert hätten. Dazu wurden verschiedene Parameter definiert, welche Merkmale von Schwall und Sunk charakterisieren. Bei 13 von insgesamt 23 untersuchten Abflussmessstationen wurde zumindest eine geringfügige Verstärkung der Schwall-Sunk-Phänomene festgestellt. Da Art und Ausmass der Veränderungen an den untersuchten Gewässern sehr unterschiedlich sind, kann keine pauschale schweizweite Antwort zur formulierten Hypothese gegeben werden. Die wesentlichen Elemente und Ergebnisse der Studie werden vorgestellt.

Résumé

Une étude effectuée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a vérifié, par une analyse hydrologique de données, l'hypothèse soutenant que les phénomènes des éclusées en Suisse se seraient modifiés au cours des derniers 20 à 30 ans. Pour cela, divers paramètres caractéristiques des éclusées ont été définis. Une amplification au moins minime du phénomène des éclusées a été constatée pour 13 des 23 stations de mesure de débits étudiées. Etant donné que le type et l'ampleur des modifications sur les cours d'eau étudiés sont très différents, aucune réponse générale valable pour toute la Suisse ne peut être donnée à l'hypothèse formulée. Les éléments et résultats importants de l'étude sont présentés.

1. Einleitung

Dieser Artikel fasst die wichtigsten Elemente und Erkenntnisse einer am Bundesamt für Umwelt (BAFU) durchgeführten Studie zusammen, welche der Hypothese nachging, ob sich in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten die Schwall-Sunk-Phänomene verstärkt und wie sich die entsprechenden Indikatoren in den letzten Jahren angesichts der Veränderungen auf dem Elektrizitätsmarkt entwickelt haben.

Für die Beschreibung der ökologischen Auswirkungen des Schwallbetriebs auf den Makrozoobenthos- und den Fischbestand wird auf BUWAL (2003) verwiesen. Dort ist für die Mehrzahl der untersuchten schwallbeeinflussten Fliessgewässer eine Beeinträchtigung der aquatischen Organismen festgestellt worden.

Die vorliegende Studie beschränkt sich weitgehend auf eine explorative Analyse hydrologischer Daten. Es wird weder eine vertiefte Ursachenforschung für festgestellte Veränderungen getrieben, noch wird eine ökologische Bewertung der Resultate vorgenommen. Zweck ist es, fundierte Information für eine Versachlichung der Diskussion rund um dieses Thema einzubringen, damit postulierte Thesen auf ihren Wahrheitsgehalt überprüft werden können. Dazu wurde versucht, ein möglichst breites Bild (d.h. eine Analyse möglichst vieler betroffener Gewässer und verschiedenster Schwall-Sunk-Parameter) der Entwicklung und der derzeitigen Verhältnisse betreffend Schwall-Sunk (im Folgenden mit «S/S» abgekürzt) zu geben.

Bild 1 gibt einen summarischen Überblick der Ergebnisse. Dazu wird im nächsten Abschnitt auf die verwendeten Daten eingegangen. Es folgt eine Beschreibung der untersuchten S/S-Merkmale und der Methoden zu ihrer Bestimmung. Daran schliesst exemplarisch die Präsentation der Ergebnisse pro analysierter Station und Merkmal an. Danach wird das Vorgehen der Synthese (Klassierung der Veränderungen, Aggregierung der einzelnen S/S-Merkmale zu einer gesamthaften Aussage pro analysierter Station sowie schweizweite Darstellungen) beschrieben. In der abschliessenden Diskussion werden die Ergebnisse kurz interpretiert und einer kritischen Würdigung unterzogen.

2. Auswahl der Untersuchungsstellen und verwendete Daten

Die Analyse basiert auf Abflussmessdaten von 23 Stationen des hydrometrischen Messnetzes des BAFU. Dabei wurden Stationen ausgewählt, die an schwallbeeinflussten Gewässern situiert sind. Bei der Auswahl der Abflussmessstationen wurde darauf geachtet, dass diese geografisch möglichst gut über die Schweiz verteilt sind, neben den grossen Alpenflüssen auch kleinere Gewässer abdecken und in unmittelbarer Nähe zum schwallauslösenden Kraftwerk gelegen sind, damit sie das Schwallsignal möglichst ungestört registrieren. Neben den vorwiegend alpinen Stationen sind auch solche aus dem voralpinen und jurassischen Gebiet vertreten (womit auch durch Wochen- und Tagesspeicher betriebene Anlagen in die Analysen einfliessen). Manche Stationen in unmittelbarer Nähe zum schwallauslösenden Kraftwerk (und unterhalb Restwasserstrecken) geben den Einfluss einer Anlage sehr «scharf» wieder, andere Stationen deutlich weiter flussab gelegen haben ein bereits leicht «verwischtes» Signal durch Retention und Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet, und manche zeichnen Mischsignale aus der Überlagerung der Einzelsignale von mehreren Kraftwerken im Einzugsgebiet auf. Die Namen der Stationen und die der Analyse zugrunde liegenden Messperioden sind in *Tabelle 1* aufgelistet. Die Karte auf der Ergebnisgrafik zur Studie *(Bild 1)* gibt einen Überblick über deren räumliche Verteilung.

Schwall-Sunk Phänomene spielen sich auf einer sehr feinen zeitlichen Skala ab (Minutenbereich). Dementsprechend ist Vorsicht mit den Grundlagendaten angezeigt, und es ist zu hinterfragen, ob festgestellte Veränderungen reale Verhältnisse widerspiegeln oder Datenphänomene sind. An den ausgewählten Stationen sind kontinuierliche Abfluss- und Wasserstandsdaten in der Regel seit 1974 in digitaler Form vorhanden (vgl. *Tabelle 1*). es ist anzumerken, dass diese «nachdigitalisiert» wurden, d.h., die im Pegelhaus registrierten Hydrographen-Streifen wurden in einem späteren Schritt manuell digitalisiert. Da der «zeitliche Vorschub» auf

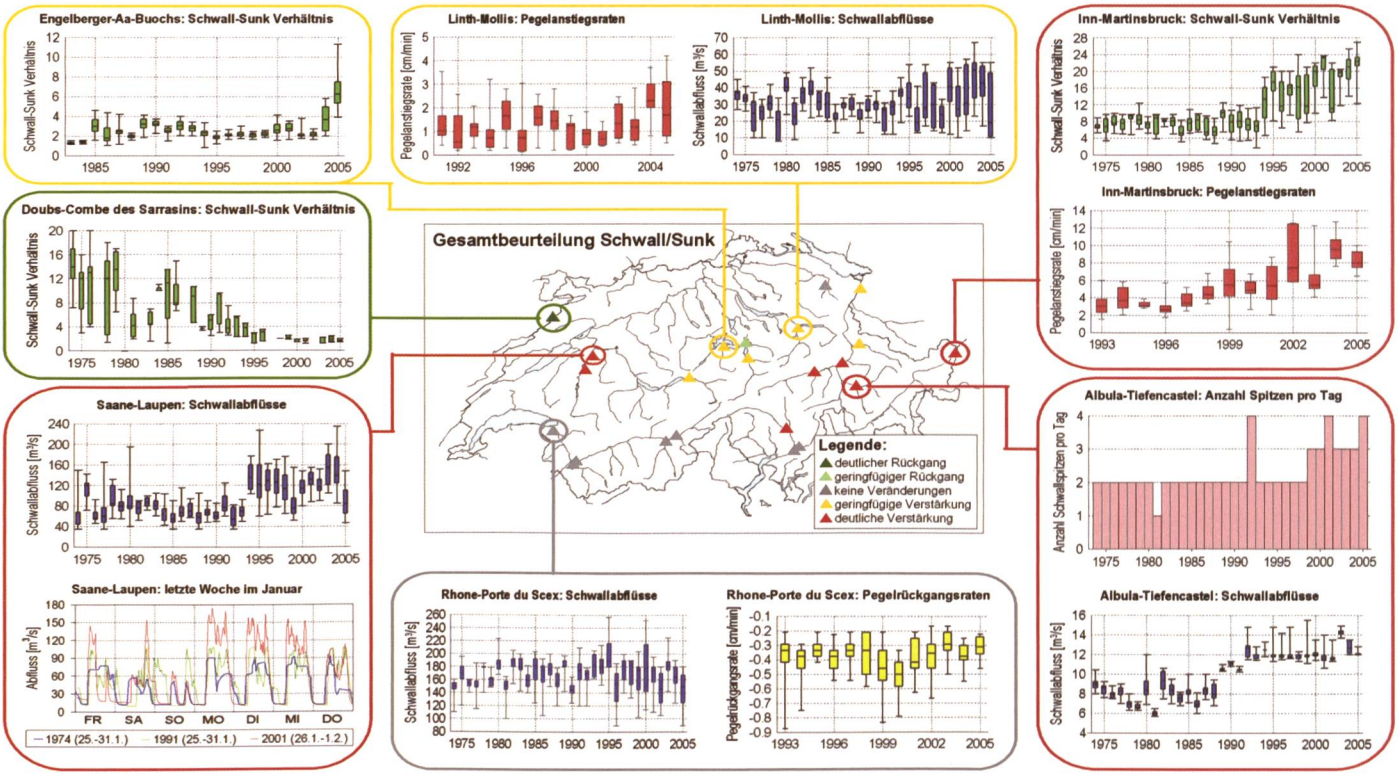

Bild 1. Grafische Zusammenfassung der Studie mit der Gesamtbeurteilung der Schwall-Sunk-Veränderungen und beispielhaften Einzelresultaten.

den Papierstreifen relativ gering ist, resultiert bei der Nachdigitalisierung hinsichtlich zeitlicher Auflösung eine gewisse Unschärfe. Je nach Parameter (z.B. für die Anstiegs- und Rückgangsraten, welche eine sehr hohe und zuverlässige zeitliche Auflösung der Grundlagendaten benötigen) war zu beurteilen, ob die Eignung der Daten gegeben ist. Erst zu einem späteren Zeitpunkt (für die meisten Stationen ab 1992/1993, siehe dritte Spalte in *Tabelle 1*) erfolgte eine automatische digitale Aufzeichnung «ab Pegel» im 10-min Intervall. Damit sind dann Phänomene auf dieser zeitlichen Skala analysierbar. Würden gröber aufgelöste Daten verwendet, würden sich andere Resultate ergeben. Wegen dieser «Skalenabhängigkeit» ist beim Vergleich von Studien und Forschungsarbeiten stets Augenmerk auf die zeitliche Auflösung der zugrunde liegenden Daten zu legen. Liegt diese Information nicht vor, erschwert dies bei manchen Parametern den Vergleich. In vielen Fällen der konsultierten Schwall-Literatur liegt Stundenauflösung vor.

Als «Beobachtungszeitfenster» für die Analysen wurde der Monat Januar und für bestimmte Parameter die letzte Woche im Januar gewählt. Die Überlegung dahinter war die Identifizierung geeigneter Zeitperioden, zu welchen die S/S-Phänomene möglichst ungestört hervortreten. Ungestört heisst in diesem Zusammenhang, dass das «Signal» aus der Einleitung des turbinierten Wassers der schwallauslösenden Wasserkraftwerke den Gesamtabfluss dominiert und nur in geringem Umfang durch natürlichen Abfluss (sei es Basisabfluss, sei es Hochwasserabfluss) überlagert wird. Im Winter treten S/S-Phänomene in der Regel am deutlichsten hervor, da zu dieser Jahreszeit in alpinen Einzugsgebieten natürlicherweise Niederwasserverhältnisse herrschen (vgl. Pfaundler und Wüthrich, 2006) und infolge der erhöhten Stromnachfrage in den Speicherkraftwerken grössere Wassermengen turbiniert werden. An einzelnen Stationen ausserhalb der Alpen musste die Beobachtungsperiode jedoch anders gewählt werden, da dort ein anderes Abflussregime vorherrscht und daher die deutlichsten und ungestörten Schwallsignale nicht unbedingt im Januar zu finden sind.

3. Auswahl der Merkmale und Bestimmungsmethode

Die zu überprüfende Hypothese soll differenziert anhand verschiedener Aspekte beleuchtet werden. Bei Schwall-Sunk handelt es sich um einen regelmässigen Wechsel zwischen zwei Zuständen (Schwall- und Sunkphase). Davon ausgehend und vom Wunsch getragen, Charakteristika mit vermuteter ökologischer Relevanz zu berücksichtigen, wurden folgende fünf Merkmale definiert und analysiert:

- 1. Merkmal: Schwallabfluss
- 2. Merkmal: Schwall-Sunk-Verhältnis
- 3. Merkmal: Pegelanstiegs- und -rückgangsraten
- 4. Merkmal: Anzahl Schwallspitzen pro Tag
- 5. Merkmal: Volatilität

Merkmal 1 ist ein Indikator für das Ausmass der Schwallphase, Merkmal 2 drückt die Intensität der Zustandsänderung aus, Merkmal 3 gibt Auskunft über die zeitliche «Schärfe» dieser Zustandsänderung, und Merkmal 4 gibt die Häufigkeit der Zustandsänderung wieder. Merkmal 5 beschreibt die Häufigkeit der Schwankungen innerhalb der Schwallphasen.

Merkmal 1, der Schwallabfluss, bringt zum Ausdruck, welche Abflusshöhe der Schwallimpuls erreicht. Indirekt – indem es etwa zu MQ (mittlerer jährlicher Abfluss) oder MHQ (mittlerer Hochwasserabfluss) ins Verhältnis gesetzt wird – ist es damit auch ein Indikator für den hydraulischen Stress während der Schwallphase, weil damit ausgedrückt wird, ob die hydraulischen Bedingungen während der Schwallphase vergleichbar mit Bedingungen während eines Hochwassers oder während der Verhältnisse bei mittlerem Abfluss sind (was wiederum einen Hinweis gibt, ob man im Bereich von potenziellem Geschiebetrieb liegt).

Bei der Bestimmung dieses Wertes ist man damit konfrontiert, dass in den meisten Fällen ein Schwallereignis kein eindeutig definiertes oberes Abflussniveau aufweist, sondern teilweise mehrere Spitzen und Schwankungen durchläuft. Für die Analyse wurde nicht die maximale Abflussspitze verwendet, sondern es wurde das Niveau eines gedanklich idealisierten Rechteckimpulses verwendet, der die reale Schwallabfluss-

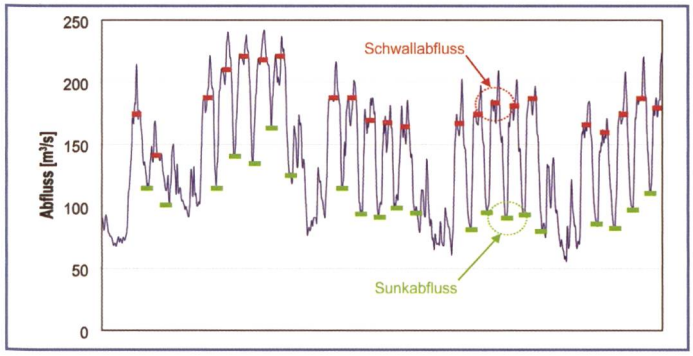

Bild 2. Extrahieren der Schwallabflüsse (rote Markierungen) und Sunkabflüsse (grüne Markierungen) aus einer Abflussganglinie des Monats Januar 2003 der Rhone bei Porte du Scex.

ganglinie repräsentativ beschreibt (damit sind die Ergebnisse zwar «konservativer» als jene Studien, welche auf die maximalen Spitzen abstellen, aber in der Aussage auch robuster). Auf diese Weise wurde aus den Abflussganglinien des Monats Januar für jeden Tag, an dem Schwallbetrieb stattfand (an den Wochenenden herrscht oft keine Schwallaktivität), ein Wert herausgelesen, und daraus resultiert für jedes Jahr eine Stichprobe von Schwallabflüssen *(siehe Bild 2)*.

Das Schwall-Sunk-Verhältnis (Merkmal 2) ist ein Indikator für die Intensität der Zustandsänderung von Schwall zu Sunk. In der einschlägigen Literatur wird dieser Parameter oft zur ökologischen Bewertung von Schwall und Sunk aufgeführt. In Studien zu ökologischen Auswirkungen wurde versucht, biologische Auswertungen mit diesem Merkmal in Verbindung zu setzen. Ansatzweise wurden daraus Hinweise für den Wertebereich abgeleitet, ab welchem mit signifikanten ökologischen Auswirkungen zu rechnen ist (vgl. BUWAL, 2003, und BMLF, 2004). Das Schwall-Sunk-Verhältnis berechnet sich aus dem Quotient von Schwallabfluss und Sunkabfluss. Für seine Bestimmung wird pro S/S-Ereignis einerseits der Schwallabfluss (analog dem Vorgehen beim Merkmal 1) sowie der Sunkabfluss aus den Abflussganglinien herausgelesen. Beim Sunkabfluss wurde – anders als beim Schwallabfluss, bei welchem ja nicht der maximale Abflusswert während der Schwallphase verwendet wurde – der minimale Abfluss während der Sunkphase berücksichtigt *(siehe Bild 2)*. Das Schwall-Sunk-Verhältnis wurde für jeden Tag im Monat Januar ermittelt, an welchem Schwallbetrieb stattfand. Daraus ergibt sich wiederum für jedes Jahr eine Stichprobe von Schwall-Sunk-Verhältniswerten.

Die Pegelanstiegs- und -rückgangsraten (Merkmal 3) beschreiben die zeitliche «Schärfe» der Zustandsänderung, d.h. die Geschwindigkeit, mit der vom Sunkzustand zu Schwallverhältnissen und wieder zurück gewechselt wird. Auch dieser Kennwert findet in der einschlägigen Literatur häufig Erwähnung. Bei diesem Parameter wurde nicht mit Abflusswerten operiert (wie bei allen anderen Parametern), sondern mit dem Pegelstand. Einerseits ist dies intuitiv besser fassbar (die Raten werden in cm/min angegeben), andererseits basiert auch das Gros der erwähnten Literaturangaben auf Wasserstandsdaten, wodurch die Ergebnisse vergleichbar werden (allerdings basieren viele Literaturangaben zu dieser Grösse nicht wie im vorliegenden Fall auf 10-min-Daten, sondern auf Stundenauflösung). Da bei diesem Merkmal eine hohe zeitliche Auflösung besonders wichtig ist, wurden nur Daten nach der automatisierten digitalen Erfassung mit effektiver 10-min-Auflösung analysiert (vgl. *Tabelle 1*). Aus diesem Grund reicht die Anzahl an betrachteten Jahren weniger weit in die Vergangenheit zurück als bei den anderen Parametern, bei denen die zeitliche Auflösung der Daten weniger kritisch ist.

Für die Bestimmung der Anstiegs- und Rückgangsraten aus der Zeitreihe der Pegelstände *(P)* wurde eine Datenreihe mit Pegeländerungsraten *(PR)* abgeleitet:

$$R_t = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{P_t - P_{t-1}}{\Delta t} \qquad (1)$$

Die Raten können sowohl positive wie auch negative Werte annehmen. Positive Werte bedeuten Pegelanstiege, negative Pegelrückgänge. Aus den so abgeleiteten Datenreihen wurden die maximalen und minimalen Werte als Pegelanstiegs- und -rückgangsraten herausgelesen. Wiederum wurde der Januar als Analyseperiode herangezogen, und es resultierte daraus pro Jahr eine Stichprobe mit den Anstiegs- und Rückgangsraten.

Zum Merkmal 4, Anzahl Schwallspitzen pro Tag: Manche Kraftwerke werden so betrieben, dass nicht nur ein Schwallimpuls, sondern zwei oder mehrere Schwallphasen pro Tag auftreten. Der Parameter zur Häufigkeit der Zustandsänderung erfasst die Anzahl an Wechseln zwischen Schwall- und Sunkphasen pro Tag. Um als eigenständige Schwallspitze gezählt zu werden, ist folgendes Kriterium aufgestellt worden: Als erste Schwallspitze wird das erstmalige tägliche Ansteigen des Abflusses zu einer Schwallspitze definiert. Wenn der Abfluss später am gleichen Tag auf mehr als 50 % dieser ersten Schwallspitze abnimmt und anschliessend wieder um mindestens 30 % derselben ansteigt, dann ist eine zusätzliche eigenständige Schwallspitze zu zählen. Analog wurde auch in Fällen mit mehr als zwei Schwallspitzen pro Tag verfahren. Als Analysezeitraum wurden für jedes Jahr die Tage der letzten Januarwoche verwendet und aus dieser Stichprobe der ganzzahlig gerundete Mittelwert berechnet.

Das fünfte Merkmal, als Volatilität bezeichnet, dient der Beschreibung der teilweise starken Schwankungen während einer Schwallphase. In vielen Fällen treten zwar nicht mehrere eigenständige Schwallspitzen pro Tag auf, aber es zeigen sich in den Ganglinien starke Schwankungen, welche durch die Reguliertätigkeit seitens des Kraftwerkbetriebes verursacht werden. Zur Ermittlung dieses Parameters wurde die Anzahl an Abflussschwankungen während der/den Schwallphase(n) eines Tages gezählt. Für diesen Parameter wurde ein Mittelwert pro Jahr, basierend auf den Werten der letzten Januarwoche, berechnet. Diesem Parameter wird keine ökologisch herausragende Bedeutung zugewiesen, da er die Schwankungshäufigkeit «innerhalb eines Zustandes» (Schwall-Phase) erfasst. Dies wird ökologisch als weniger gravierend erachtet, als es beim Merkmal 4 der Fall ist. Letzteres gibt die Häufigkeit grundsätzlicher Abflusszustandsänderungen wieder und kann somit als Indikator für hydraulischen Stress angeführt werden. Trotzdem wurde die Volatilität untersucht und dokumentiert, weil bei der visuellen Beurteilung der Ab-

Stationsname	Periode	automatisiert
Aare-Brienzwiler	1974-2005	1993
Albula-Tiefencastel	1974-2005	1993
Doubs-Combe de Sarrasin	1974-2005	-
Engelberger-Aa-Buochs	1983-2005	1992
Drance-Martigny	1991-2005	2002
Inn-Martinsbruck	1974-2005	1993
Landquart-Felsenbach	1974-2005	1993
Linth-Mollis	1974-2005	1992
Moesa-Lumino	1977-2005	2002
Muota-Ingenbohl	1974-2005	1992
Reuss-Seedorf	1974-2005	1993
Rhein-Diepoldsau	1974-2005	1993
Rhein-Domat/Ems	1974-2005	1993
Rhone-Branson	1974-2005	1993
Rhone (Rotten)-Brig	1974-2005	1995
Rhone-Porte du Scex	1974-2005	1993
Saane-Laupen	1974-2005	1999
Sarine-Fribourg	1974-2005	1994
Sitter-St. Gallen	1981-2005	1994
Ticino-Bellinzona	1974-2005	1992
Ticino-Pollegio	1987-2005	1994
Vispa-Visp	1974-2005	1994
Vorderrhein-Ilanz	1974-2005	1992

Tabelle 1. Liste der analysierten Abflussmessstationen und der verwendeten Messperioden.

flussganglinien Änderungen in der Form der Schwallimpulse aufgefallen sind (siehe z.B. *Bild 4*). Verschiedentlich wurde die These postuliert, dass als Folgeerscheinung der Veränderungen auf dem Elektrizitätsmarkt und des zunehmend kurzfristig ausgerichteten Handels an den Elektrizitätsbörsen die Reguliertätigkeit der Speicherkraftwerke zugenommen habe, wozu der Volatilitäts-Parameter Indizien liefern kann.

4. Aufbereitung der Ergebnisse und Darstellung

Während bei den Merkmalen 4 und 5 aus den Stichproben Mittelwerte für die jeweilige Untersuchungsperiode berechnet und für die nachfolgenden Auswertungen als repräsentative Grösse für das spezifische Jahr herangezogen wurden, ist bei den Merkmalen 1 bis 3 die Variabilität respektive die Verteilung der Stichprobenwerte explizit für die nachfolgenden Analysen und grafischen Auswertungen aufgenommen worden. Zur Darstellung wurden so genannte Boxplots verwendet, deren Prinzip in *Bild 3* illustriert ist.

Grund dafür ist einerseits die Tatsache, dass die Merkmale in den Stichproben zum Teil eine erhebliche Variabilität aufweisen und es daher schwierig ist, einen repräsentativen Wert zu extrahieren. Zweitens besteht ja das Ziel der Studie, Veränderungen in den Merkmalen zu untersuchen. Trendhaftes Verhalten bedeutet aber nicht nur Veränderungen der Mittelwerte, sondern auch der Variabilität eines Merkmales.

Mit dem geschilderten Vorgehen wurden für alle analysierten Messstationen die fünf Merkmale für die Untersuchungsperiode bestimmt. Als Ergebnis resultieren pro Station grafische Auswertungen der Jahresreihen, wie sie z.B. in *Bild 1* zu sehen sind. Aus diesen Darstellungen der Jahresreihen der einzelnen Merkmale wurde grafisch-visuell die Entwicklung der verschiedenen S/S-Merkmale beurteilt. Exemplarisch ist in *Bild 5* für die Station Alpenrhein bei Domat/Ems das ganze Set der stationsweisen Auswertungen dargestellt (entsprechende Grafiken liegen für sämtliche Stationen vor und sind auf der am Ende des Artikels angegebenen Internetseite des BAFU zum Thema Schwall abrufbar). Bei der Betrachtung der Boxplot-Grafiken in Bild 5 fällt insbesondere eine Zunahme des Schwall-Sunk-Verhältnisses seit Beginn der 1990er-Jahre auf. Festzuhalten ist auch ein zwischenzeitlicher Einbruch Mitte der 1980er-Jahre. Betrachtet man aber die gesamte Beobachtungsperiode, dann kann man von einer deutlichen Zunahme der Schwall-Sunk-Verhältniswerte sprechen. Bei den Schwallabflüssen ist eine Zunahme der Mediane zumindest ab dem Jahr 2000 feststellbar. Bemerkenswert ist bei den beiden genannten Parametern die zunehmende Variabilität der Werte in den letzten Jahren. Obwohl bei den Pegelanstiegsraten das Jahr 2005 massiv höhere Werte aufweist als die anderen Jahre zuvor, kann hier noch nicht von einer deutlichen Zunahme gesprochen werden, hier bleibt die Entwicklung in den kommenden Jahren abzuwarten. Bei den Pegelrückgangsraten ist kein Trend ersichtlich. Die Anzahl Schwallspitzen hat sich auch nicht verändert, der gerundete Mittelwert liegt konstant bei eins. Hingegen hat das Merkmal Volatilität am Alpenrhein deutlich zugenommen. Dies lässt sich auch anhand der Darstellung in *Bild 4*

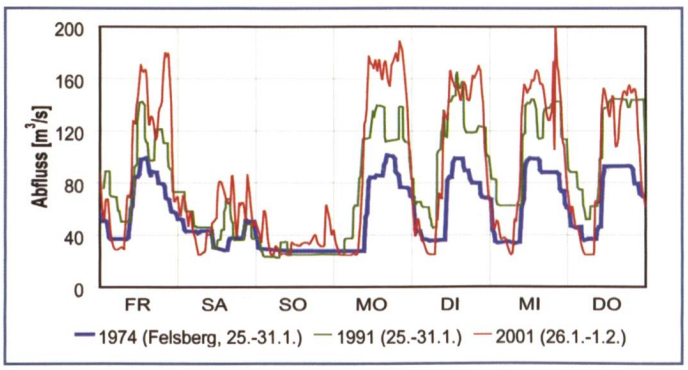

Bild 4. Vergleich der Abflussganglinien der letzten Januarwoche der Jahre 1974, 1991 und 2001 am Rhein bei Domat/Ems.

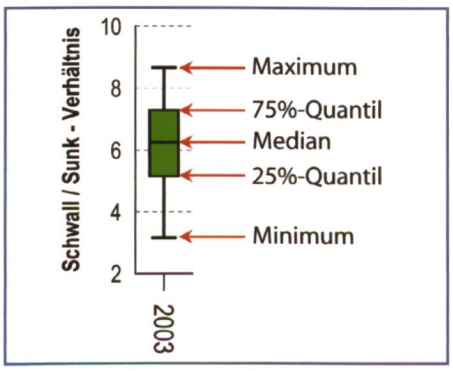

Bild 3. Das Prinzip des Boxplots, erläutert am Beispiel der Stichprobe der Schwall-Sunk-Verhältnisse im Januar 2003 an der Aare bei Brienzwiler.

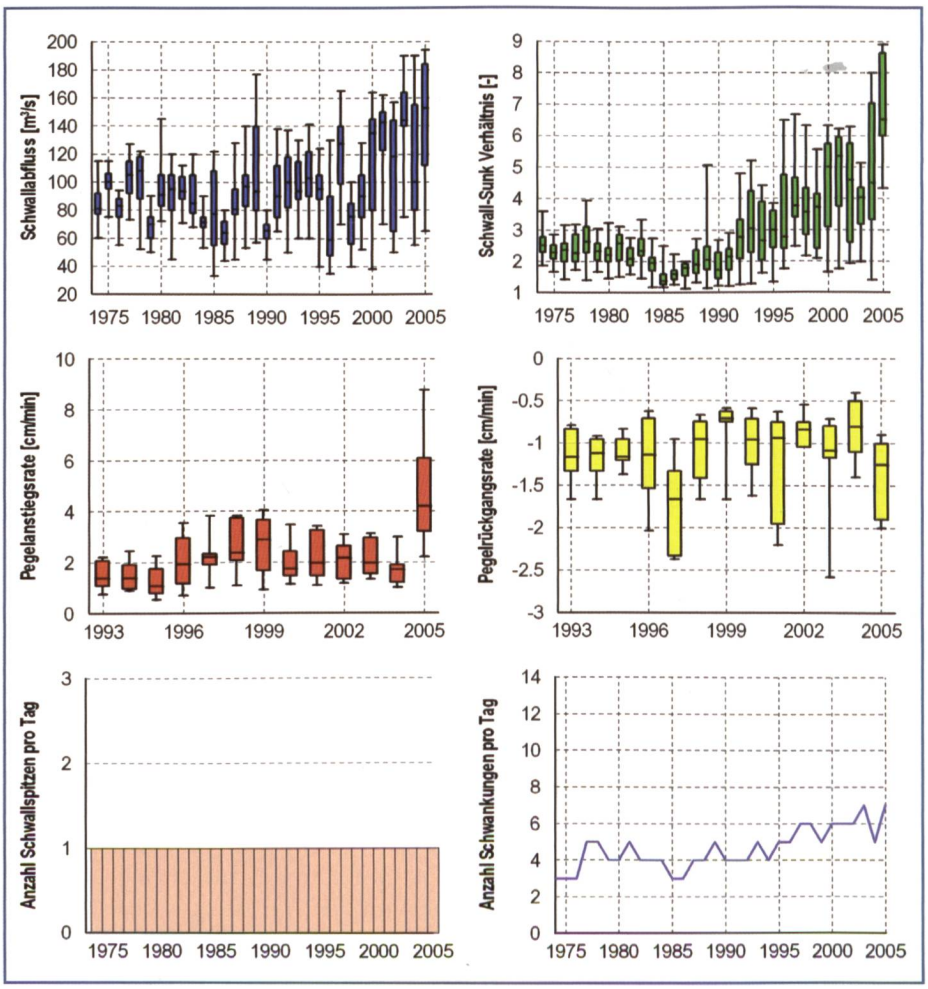

Bild 5. Grafische Auswertung der Schwallmerkmale für den Rhein bei Domat/Ems: Schwallabfluss (oben links), Schwall-Sunk-Verhältnis (oben rechts), Pegelanstiegsraten (Mitte links), Pegelrückgangsraten (Mitte rechts).

verdeutlichen. Während die Schwallspitzen des Jahres 1974 noch eher dem Bild eines Rechteckimpulses entsprechen, ist bei jenen des Jahres 2001 anhand der häufigen, geringfügigen Abflussschwankungen eine verfeinerte Reguliertätigkeit der Kraftwerke erkennbar. In dieser Darstellungsform lassen sich auch einige der anderen erwähnten Veränderungen von S/S-Phänomenen aufzeigen. Analoge Darstellungen wurden für alle 23 untersuchten Stationen erstellt.

5. Synthese

Während die Grafiken zu den einzelnen analysierten Parametern eine sehr detaillierte Einschätzung pro untersuchte Messstation erlauben, erschwert die Vielfalt an Information eine Gesamtbeurteilung. Die Zielsetzung der Studie ist aber die schweizweite Perspektive zur Einschätzung der Veränderung von S/S-Phänomenen. Deswegen wurden in einem Syntheseschritt die Detailinformationen in eine generalisierte Aussage pro Station aggregiert und das Ensemble der Stationen dargestellt. Das Vorgehen war, pro Merkmal und Station die Entwicklungstendenz auf der Basis einer visuellen Einschätzung grob zu klassieren und das Ergebnis daraus für alle untersuchten Stationen in einer Schweizer Karte darzustellen. In *Bild 6* sind die Karten mit der Entwicklungstendenz der Parameter Schwall-Sunk-Verhältnis, Schwallabfluss, Pegelanstiegsraten und Anzahl Schwallspitzen pro Tag dargestellt. Zu sehen ist ein sehr «buntes Bild», mit je nach Merkmal und Station unterschiedlichen Entwicklungstendenzen.

In einem zweiten Aggregationsschritt wurde eine alle untersuchten Einzelmerkmale berücksichtigende Gesamtklassierung pro Station zur Einstufung der Entwicklung der S/S-Phänomene in den letzten 20 bis 30 Jahren durchgeführt und wiederum kartografisch umgesetzt. Diese Gesamteinschätzung ist subjektiv und nicht nach streng quantitativen Kriterien erstellt worden. Die verschiedenen Merkmale fliessen mit unterschiedlicher Gewichtung, in Abhängigkeit der ihnen beigemessenen ökologischen Relevanz, in die Gesamtbeurteilung ein. Zentrale Parameter sind das Schwall-Sunk-Verhältnis, die Pegelanstiegs- und -rückgangsraten sowie die Anzahl Schwallspitzen pro Tag. Etwas weniger stark gewichtet wurden die Schwallabflüsse. Das Merkmal Volatilität floss nicht in die Gesamtbeurteilung mit ein, da diesem eine geringe ökologische Bedeutung zugewiesen wurde. Für die genauen Klassierungsregeln zur Einschätzung der Veränderungen wird auf die im Frühjahr 2007 erscheinende BAFU-Publikation, in welcher die komplette Studie mit der genauen Vorgehensweise vorgestellt wird, verwiesen.

Das Ergebnis dieser Klassierung ist auf der Karte in *Bild 1* zu sehen und gibt einen summarischen Überblick zur Einschätzung bezüglich festgestellter Veränderungen der Schwall-Sunk-Aktivität in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten.

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Aussagen zu festgestellten Veränderungen basieren nicht auf quantitativen Trendanalysen, sondern aufgrund visueller, qualitativer Einschätzung. Die eingangs formulierte These – pro memoria: «die Schwall-Sunk-Phänomene haben in den letzten 20 bis 30 Jahren zugenommen» – trifft bei etwas mehr als der Hälfte der untersuchten Gewässerstellen zu, da für einzelne oder mehrere der analysierten Schwall-Parameter eine geringfügige bis deutliche Zunahme festgestellt wurde. Eine pauschale Aussage für die ganze Schweiz lässt sich daraus aber nicht ableiten, da die Ergebnisse der einzelnen Stationen nach Art und Ausmass der Veränderungen sehr heterogen sind. Auch tendieren die Einzelmerkmale nicht immer in dieselbe Richtung. An vereinzelten Stationen wurde eine Verminderung der S/S-Aktivität festgestellt. An manchen Standorten ist die Variabilität der analysierten Merkmale derart gross, dass sich keine Trends ablesen lassen und diese Stationen in der Folge der Kategorie «keine Veränderung» zugeordnet wurden.

Zur «kritischen Würdigung» der Resultate sind folgende Punkte zu beachten:

- Bei der vorliegenden Studie handelt es

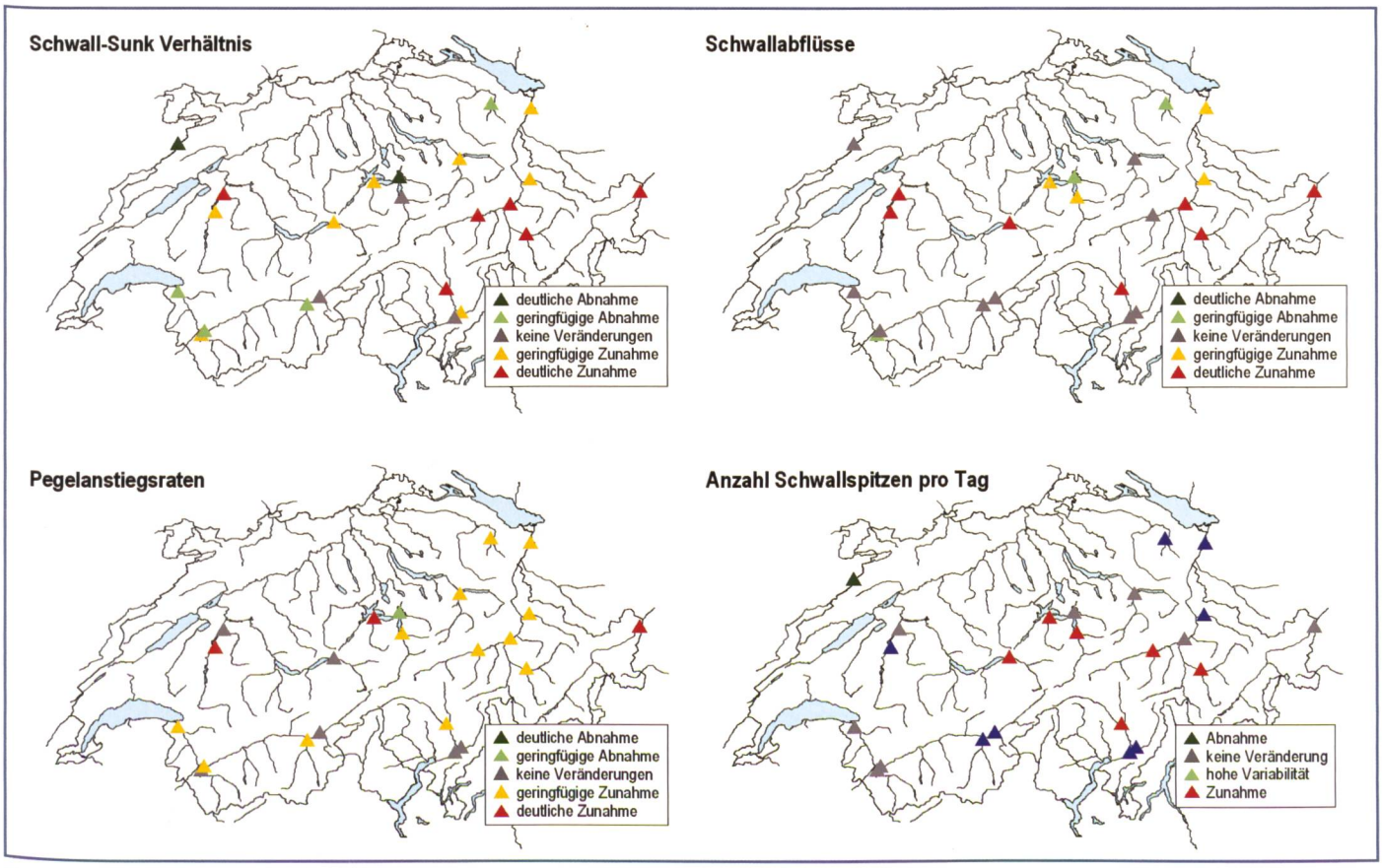

Bild 6. Kartografische Darstellungen der Entwicklungstendenz verschiedener S/S-Merkmale an den Abflussmessstationen.

sich um eine «Punktanalyse», d.h., es werden die Verhältnisse am Ort der untersuchten Messstationen klassiert. Damit wird aber keine Aussage über die Länge der jeweils betroffenen Gewässerstrecke gemacht. Einen räumlichen Überblick über die von Schwall betroffenen Gewässerstrecken bietet die Karte in Tafel 5.3 des Hydrologischen Atlasses der Schweiz (Margot et al., 1992). Einzelne der untersuchten Abflussmessstationen sind für eine längere Gewässerstrecke repräsentativ (z.B. jene an den grossen Alpenflüssen), andere sind nur für relativ kurze Gewässerabschnitte aussagekräftig, d.h., die einzelnen Punkte in den kartografischen Darstellungen haben – aus einer gesamtschweizerischen Sicht – nicht das gleiche Gewicht.

- Die meisten der festgestellten Veränderungen ereigneten sich seit den 1990er-Jahren, oft in den allerletzten Jahren, wobei die Trends teils sprunghaft, teils stetig verlaufen sind und in manchen Parametern deutlicher zutage treten als bei anderen. Festgestellte und beurteilte Veränderungen betreffen nicht nur die Mittelwerte der untersuchten Merkmale, sondern auch die Entwicklung der Variabilität (Zu- wie Abnahme) der Schwallparameter.
- Nochmals wird festgehalten, dass mit der vorliegenden Klassierung zur Veränderung der Schwallphänomene keine Bewertung hinsichtlich einer ökologischen Verschlechterung vorgenommen wurde. Obwohl bewusst ökologisch relevante Parameter festgelegt und berücksichtigt wurden und die Ergebnisse damit eine hohes Potenzial haben, ökologisch verwertet zu werden, müsste ein solcher Folgeschritt auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse aufbauend erst durchgeführt werden.
- Aufgrund der grossen Informationsmenge und Vielzahl an untersuchten Parametern wurde eine geeignete Synthese als nötig erachtet. Dies ermöglicht es, die Ergebnisse gemäss dem Konzept der Informationspyramide stufengerecht zu kommunizieren, d.h., je nach Adressat sind Detailinformationen oder komprimierte Informationen für «Nicht-Experten» und Entscheidungsträger angebracht. Diese Aggregation bringt zwangsweise einen Informationsverlust mit sich. Auch wurde die Aggregation nicht formalquantitativ, sondern visuellsubjektiv durchgeführt. Die damit vermittelte qualitative Aussage wird aber als «gehaltvoll» eingeschätzt und vermindert nicht die Aussagekraft zur Beantwortung der Ausgangshypothese.
- Es wurde keine stationsbezogene Ursachenforschung betrieben (dazu gibt eine VAW-LCH-Studie teilweise Hinweise, VAW und LCH, 2006), sondern eine rein explorative Datenanalyse durchgeführt. Ganz allgemein können für die festgestellten Veränderungen der S/S-Aktivität diverse mögliche Gründe genannt werden: Installation neuer Turbinen (z.B. mit grösserem Schluckvermögen), neue Restwasservorschriften (z.B. gerineres Schwall-Sunk-Verhältnis aufgrund geänderter Dotationsmengen), veränderte Betriebsführung (z.B. kurzfristigere Reguliertätigkeit wegen verstärktem Bedarf an Regel- und Spitzenstrom, die Veränderungen an einigen Stationen bei den Merkmalen 4 und 5 sind zumindest ein Indiz dafür), Ausfall von Maschinensätzen (Revisionsarbeiten, Unfälle, z.B. Kraftwerke Nendaz im Wallis im Dezember 2000), hydroklimatische Variabilität (z.B. Veränderungen der Niederwasserabflüsse) usw.
- Neue Speicher und schwallauslösende Kraftwerke wurden seit Ende der 1970er-Jahre keine errichtet, dementsprechend sind seit dieser Zeit auch keine neuen Gewässerstrecken von S/S-Phänomenen betroffen. Im Rahmen der hier präsentierten Studie wurde untersucht, ob sich an den bestehenden Strecken Art und Ausmass der Schwallphänomene verändert haben.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich hat 2006 in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire de Constructions Hydrauliques der EPF Lausanne eine Studie zum Thema Schwall und Sunk erarbeitet (VAW und LCH, 2006). Dabei wurde ebenfalls versucht, Trendaussagen zur Entwicklung der Schwallbeeinflussung in der Schweiz der letzten 30 Jahre zu machen. Die hauptsächlichen Unterschiede zur Studie des BAFU liegen bei der Auswahl der untersuchten Messstationen, bei der Parameterwahl sowie bei den verwendeten Grundlagendaten. Über die Trendaussagen hinaus wurden von der VAW und LCH Untersuchungen zu Möglichkeiten zur Reduktion von Schwall und Sunk durchgeführt. Vorgeschlagen werden Rückhaltevolumen unterschiedlichen Fassungsvermögens, damit im Fliessgewässer ein vorbestimmtes (kritisches) Schwall-Sunk-Verhältnis eingehalten werden kann (siehe Artikel Minor und Möller in diesem Heft). Wo sich die vorliegende mit der VAW/LCH-Studie vergleichen lässt, resultieren im Detail in etwa dieselben Ergebnisse. In der auf diesen Ergebnissen aufbauenden Interpretation unterscheiden sich die Aussagen aber zum Teil.

Die komplette Studie wird im Frühjahr 2007 als BAFU-Publikation erscheinen. Im vorliegenden Artikel wurden die wesentlichen Ergebnisse präsentiert. Auf die Methodik wurde hier nur soweit es für das Verständnis nötig ist eingegangen. Bis zum Erscheinen der erwähnten Publikation wird auf die Internetseiten des BAFU zum Thema Schwall verwiesen (www.umwelt-schweiz.ch > Gewässerschutz > Restwasser und Schwallbetrieb > Schwall- und Sunkbetrieb), auf welcher die grafisch aufbereiteten Einzelergebnisse der berücksichtigten Abflussmessstationen eingesehen werden können.

Danksagung

Daniel Streit von der Abteilung Hydrologie des BAFU für die Bereitstellung der Abfluss- und Wasserstandsdaten.

Literatur

BUWAL, 2003: Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes. Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei Nr. 75. Bern.

BMFL, 2004: Methodik zum Bericht der Ist-Bestandesaufnahme für die österreichischen Anteile der Flussgebietseinheiten Donau, Rhein und Elbe. Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Umwelt. Wien.

Margot A., Sigg R., Schädler B., Weingartner R., 1992: Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke und Seeregulierungen. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Landeshydrologie und -geologie (Hrsg.). Bern.

Meile T., Fette M., Baumann P., 2005: Syntheseberichtt Schwall/Sunk. Publikation des Rhône-Thur-Projektes.

Pfaundler M. und *Wüthrich T.*, 2006: Saisonalität hydrologischer Extreme. Das zeitliche Auftreten von Hoch- und Niederwasser in der Schweiz. In: Wasser, Energie, Luft. Heft 2/2006.

VAW und LCH, 2006: Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk – eine Standortbestimmung. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich und Laboratoire de Constructions Hydrauliques EPF Lausanne. Zürich – Lausanne.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Martin Pfaundler, Mario Keusen*

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

CH-3003 Bern-Ittigen

E-Mail: martin.pfaundler@bafu.admin.ch