

12
07

> Veränderungen von Schwall-Sunk

Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

12
—
07

> Veränderungen von Schwall-Sunk

*Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung
von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz*

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Martin Pfandler und Mario Keusen, Abteilung Wasser, BAFU

Zitiervorschlag

Pfandler M., Keusen M. 2007: Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0712. Bundesamt für Umwelt, Bern. 110 S.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Markus Fette, EAWAG

Download PDF

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0712-d

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: UW-0712-D

© BAFU 2007

> Inhalt

Abstracts	4
Vorwort	5
Zusammenfassung	6
<hr/>	
1 Einleitung	8
1.1 Motivation und Randbedingungen	8
1.2 Was ist Schwall-Sunk	9
1.3 Ausgangssituation – Schwall-Sunk in der Schweiz	10
1.4 Zielsetzung	10
<hr/>	
2 Schwall-Sunk: seine ökologische Relevanz	11
<hr/>	
3 Datengrundlage	12
3.1 Auswahl der Untersuchungsstellen	12
3.2 Verwendete Daten	13
3.3 Abfluss- und Wasserstandsdaten	14
3.4 Wahl des Zeitfensters	14
<hr/>	
4 Schwall-Sunk Merkmale: Definition und Methodik	17
4.1 Merkmal 1: Schwallabfluss	18
4.2 Merkmal 2: Schwall-Sunk Verhältnis	19
4.3 Merkmal 3: Pegelanstiegs- und -rückgangsraten	20
4.4 Merkmal 4: Anzahl Schwallspitzen pro Tag	21
4.5 Merkmal 5: Volatilität	22
<hr/>	
5 Aufbereitung der Ergebnisse und Darstellung	24
<hr/>	
6 Synthese	29
6.1 Klassierung der Veränderungen der Einzelmerkmale	29
6.2 Summarische Klassierung der Entwicklung der Schwall-Sunk Phänomene	32
<hr/>	
7 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	34

Anhang I	37
«Steckbriefe» (Zusammenstellungen von Auswertegrafiken) zu den untersuchten schwallbeeinflussten Abflussmessstationen	37
<hr/>	
Anhang II	107
Kartografische Darstellungen zur Klassierung der Veränderungen der analysierten Schwall-Sunk Merkmale	107
<hr/>	
Literatur	110

> Abstracts

Being based on the analysis of hydrologic data, the present study aims at examining the hypothesis that hydro peaking has seen significant alterations during the last 20–30 years in Switzerland. To that end a number of parameters describing different features related to hydro peaking have been defined. At 13 out of 23 analysed runoff gauging stations an at least slight amplification of hydro peaking has been identified. Since the type and extent of the amplification varies among the analysed rivers, no answer globally valid for Switzerland can be given to the formulated hypothesis.

In der vorliegenden Studie wurde mittels einer hydrologischen Datenanalyse die Hypothese überprüft, 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 Aussage zur formulierten Hypothese gemacht werden.

La présente étude 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.

Il presente studio ha verificato, per mezzo di un'analisi idrologica dei dati, l'ipotesi che il fenomeno delle onde di piena artificiali in Svizzera abbia subito delle modificazioni nel corso degli ultimi 20–30 anni. A questo scopo sono stati definiti diversi parametri caratteristici delle onde di piena artificiali. Un'amplificazione del fenomeno delle onde di piena artificiali è stata constatata per 13 delle 23 stazioni di misura delle portate analizzate. Dato che il tipo e l'ampiezza delle modificazioni subite dai corsi d'acqua studiati sono molto differenti, nessuna risposta generale valida per tutta la Svizzera può essere data all'ipotesi formulata.

Keywords:

Hydro peaking;
Trends;
Analysis of hydrologic data;
Hydro power

Stichwörter:

Schwall-Sunk;
Trend;
Analyse hydrologischer Daten;
Wasserkraft

Mots-clés :

Eclusées ;
Tendances ;
Analyse de données
hydrologiques ;
Force hydraulique

Parole chiave:

Ondate di piena artificiali;
Tendenze;
Analisi dei dati idrologici;
Forza idraulica

> Vorwort

Die Energiepolitik ist eine der grossen Herausforderungen der kommenden Jahre. Im Zentrum der Debatte stehen dabei die Versorgungssicherheit und der Klimaschutz. Die Wasserkraft spielt dabei eine wesentliche Rolle. Sie ist zum einen die zentrale Säule der Schweizer Elektrizitätswirtschaft, zum anderen stellt sie eine CO₂-arme Form der Elektrizitätsproduktion dar.

Einen besonderen Stellenwert nehmen dabei die Speicherkraftwerke mit ihrer Fähigkeit ein, kurzfristig Spitzen- und Regelstrom zur Verfügung zu stellen. Durch den bedarfsorientierten Turbinierbetrieb der Kraftwerke werden regelmässige Wechsel zwischen den unterschiedlichen Abflusszuständen (mit Schwall wird die Phase der künstlich erhöhten Abflüsse, mit Sunk die Niederwasserphase bezeichnet) generiert. Dieses Phänomen - kurz Schwall-Sunk genannt - verursacht diverse negative gewässerökologische Auswirkungen.

Immer wieder wird postuliert, dass sich aufgrund der Veränderungen auf dem europäischen Strommarkt (Stichwort Liberalisierung) Schwall-Sunk Phänomene verstärkt haben. Ebenso taucht im Zusammenhang beobachteter Fischrückgänge die Hypothese auf, dass eine Zunahme von Schwall-Sunk dafür teilweise verantwortlich ist. Auch gesetzgeberische Initiativen haben das Thema Schwall-Sunk aufgenommen.

Zur Versachlichung der diesbezüglichen Diskussionen und damit die postulierten Thesen auf ihren Wahrheitsgehalt überprüft werden, hat das BAFU die vorliegende Studie durchgeführt.

Der Nutzen, den wir dabei zu stiften hoffen, ist ein dreifacher:

- > Zunächst das Aufstellen und die Definition von Merkmalen, anhand derer Schwall-Sunk festgemacht werden kann.
- > Dann eine schweizweite Standortbestimmung: eine „nüchterne“ Darstellung und Datengrundlage über das Ausmass und die aktuellen Verhältnisse von Schwall-Sunk an den verschiedensten Gewässern in der Schweiz. Damit haben wir eine wertvolle Basis geschaffen, auf der Folgearbeiten wie z.B. ökologische Interpretationen aufbauen können.
- > Schliesslich die eigentlichen Trendaussagen über beobachtete Veränderungen der definierten Schwall-Sunk Merkmale.

Wir hoffen, mit dieser Studie einen Beitrag geleistet zu haben, in den Debatten Mutmassungen durch Fakten zu ersetzen.

Stephan Müller
Chef Abteilung Wasser
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Haben sich Schwall-Sunk Phänomene in den letzten 20–30 Jahren in der Schweiz in Art und Ausmass verändert? Das ist – in eine knappe Formel gebracht – die Frage, auf welche vorliegender Bericht eine Antwort geben will.

Dazu wurde eine Datenanalyse für 23 Messstationen an schwallbeeinflussten Fließgewässern durchgeführt. Anhand verschiedener hydrologisch-hydraulischer Merkmale wurden die Entwicklung in den vergangenen drei Jahrzehnten und die Verhältnisse in den letzten Jahren (bis und mit dem Jahr 2005) aufgezeigt.

Mit den erzielten Ergebnissen wird die Faktenlage so präsentiert, dass pro Station einerseits eine detaillierte Darstellung der untersuchten Merkmale über die Zeit hinweg geliefert wird, andererseits die Information verdichtet und eine festgestellte Veränderung (Zu- oder Abnahme) über eine visuell-qualitative Auswertung in klassierter Form kommuniziert wird.

Im Rahmen dieser Studie wurde aber a) keine ökologische Bewertung durchgeführt und b) keine vertiefte Ursachenanalyse festgestellter Veränderungen betrieben (insbesondere wurden die Resultate nicht hinsichtlich der Hypothese eines Zusammenhangs mit der Strommarktliberalisierung interpretiert). Für die beiden letztgenannten Punkte stellen die vorliegenden Ergebnisse jedoch eine gute Informationsgrundlage dar, weil einerseits die Auswahl der untersuchten Schwall-Sunk Merkmale unter ökologischen Erwägungen erfolgte und sich andererseits bei vielen der untersuchten Stationen Veränderungen zeigen, welche Indizien für eine Interpretation der genannten Hypothese liefern.

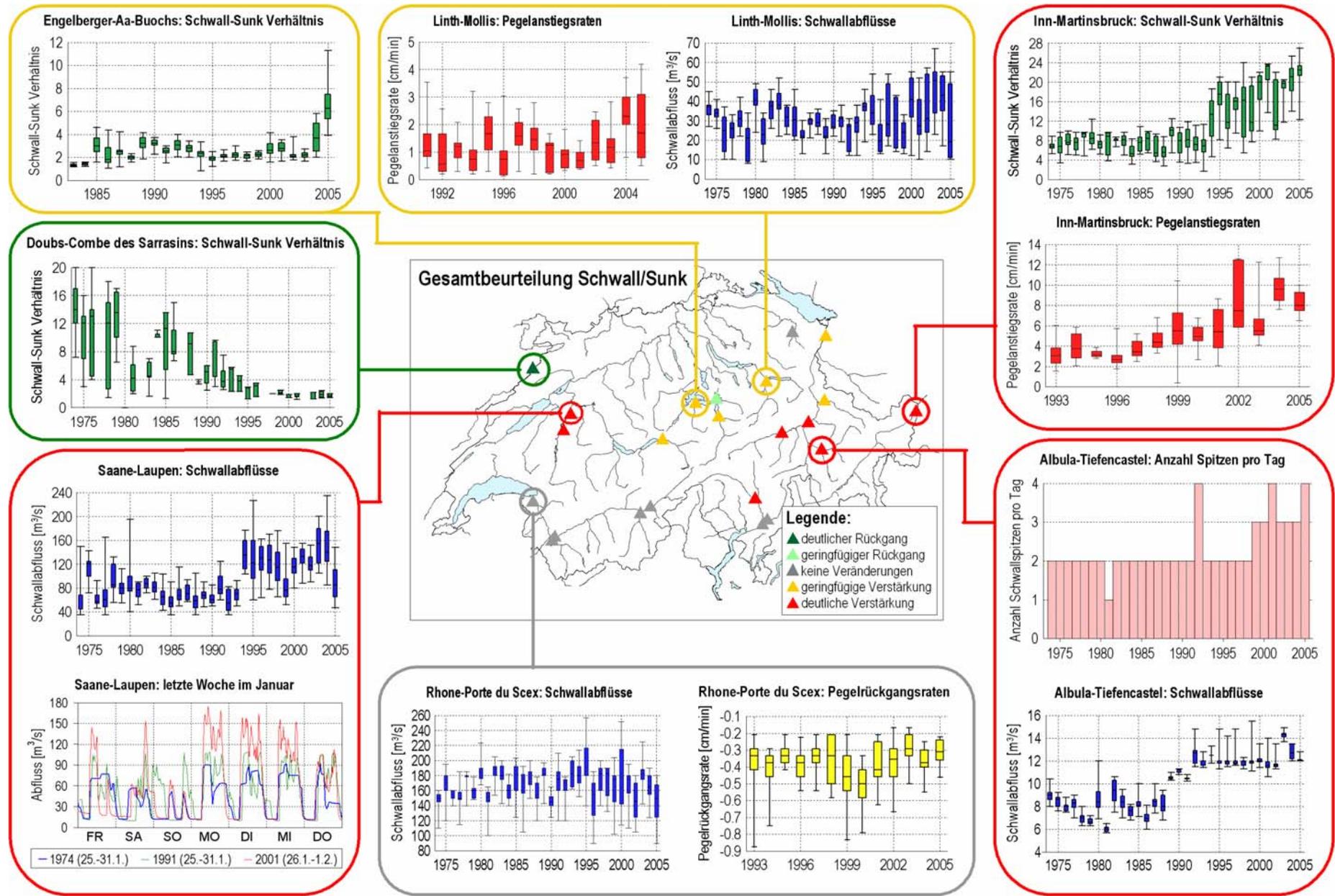
Die Antwort auf die eingangs formulierte Fragestellung fällt differenziert aus: Die Resultate zeigen, dass von den insgesamt 23 untersuchten Stationen sechs eine deutliche und sieben eine geringfügige Zunahme der Schwall-Sunk Merkmale aufweisen. Bei zwei Stationen wurde eine Abnahme festgestellt, bei den restlichen Stationen konnte keine erkennbare Veränderung aus den Daten abgeleitet werden. Über Art und Ausmass der Veränderungen lässt sich keine pauschale Aussage machen, da sich von Station zu Station ein anderes Bild ergibt. Bei einem Gros der festgestellten Zunahmen traten die Veränderungen in den letzten Jahren ein.

Die «Synthesegratik» (Abbildung auf der Folgeseite) zeigt eine grafische Zusammenfassung der Studie mit der Gesamtbeurteilung der Schwall-Sunk Veränderungen und beispielhaften Einzelresultaten.

Neben den Tendaussagen liefern die Ergebnisse auch eine Standortbestimmung, indem die Grössenordnung und die aktuellen Verhältnisse von Schwall-Sunk an den verschiedensten Gewässern in der Schweiz aufgezeigt werden.

Synthesegrafik.

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



1 > Einleitung

1.1 Motivation und Randbedingungen

Immer wieder wird die These aufgestellt, dass sich die Schwall-Sunk Problematik in der Schweiz in den letzten 20–30 Jahren verschärft habe. Argumentiert wird dabei unter anderem mit beobachteten Rückgängen von Fischfängen (mit Schwall-Sunk als eine der möglichen Ursachen) sowie mit den Entwicklungen auf dem Elektrizitätsmarkt.

Zwar existieren für vereinzelte Fallbeispiele Untersuchungen zu dieser Thematik, aber es liegt keine systematische Analyse vor, die nach einheitlicher Methodik eine schweizweite Auswertung vornimmt. Die vorliegende Studie bezweckt, genau diese Lücke zu füllen und damit die postulierte These zu überprüfen. Dieses Ziel soll erreicht werden, indem Veränderungen relevanter Merkmale der Schwall-Sunk Aktivität seit den 1970er-Jahren bis heute analysiert, dargestellt und qualitativ beurteilt werden.

Als Vorleistung wurde eine Reihe von Merkmalen definiert, anhand welcher verschiedene Aspekte von Schwall-Sunk Erscheinungen erfasst werden. Die eigentliche Analyse bestand darin, die Ausprägung dieser Merkmale im zeitlichen Verlauf an einer Auswahl von schwallbeeinflussten Gewässern zu bestimmen. Aus der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung ergab sich eine qualitative Beurteilung über Art und Ausmass der Veränderungen.

Die durchgeführte Studie ist eine explorative Analyse hydrologischer Daten. Mittels verfügbarer Abflussdaten von Messstationen an schwallbeeinflussten Gewässern wurde trendhaftes Verhalten untersucht. Die getroffenen Aussagen beinhalten aber keine ökologische Bewertung, sondern beschränken sich auf eine Klassierung der aus den Abflussdaten abgeleiteten Veränderungen der einzelnen Schwallmerkmale. Aufgrund komplexer Zusammenhänge und bestehender Wissenslücken in den Wirkungsmechanismen lassen sich die festgestellten Veränderungen nicht unmittelbar in eine ökologische Wertung «übersetzen». Eine ökologische Bewertung wäre Gegenstand einer auf den vorliegenden Resultaten aufbauenden Studie.

Festzuhalten ist auch, dass es sich um «Punktaussagen» handelt, d.h. es wird die Situation an der jeweiligen Abflussmessstation untersucht. Damit ist aber keine Aussage gemacht, wie lang die von Schwall-Sunk betroffenen Gewässerstrecke sind (z.B. ob die an der Station festgestellten Verhältnisse repräsentativ für eine längere Strecke flussab sind, oder kurz danach eine Einmündung eines grösseren Gewässers erfolgt, wo das Schwallsignal deutlich gedämpft wird, oder sich kurz vor der Mündung in einen See befindet, wo das Schwallsignal weggefiltert wird).

1.2 Was ist Schwall-Sunk

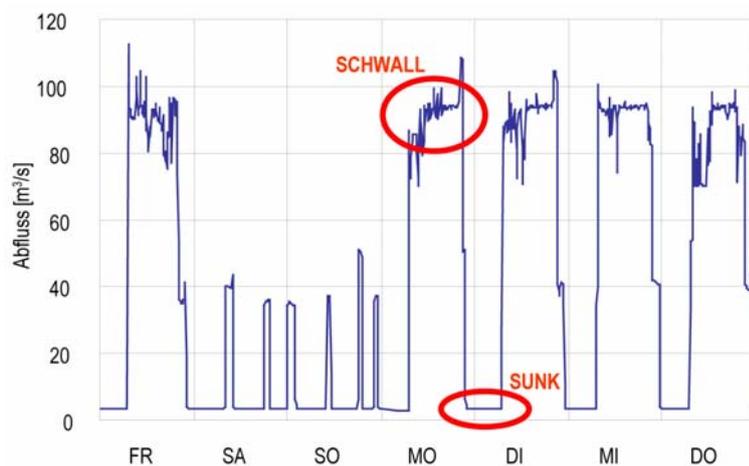
Als «Schwall und Sunk» werden regelmässige Abflussschwankungen in Fliessgewässern bezeichnet, welche durch den bedarfsorientierten Betrieb (Spitzen- oder Regelstrom) von Speicherkraftwerken hervorgerufen werden.

Die Schwallabflüsse treten in der Regel tagesrhythmisch auf, manchmal auch mehrmals pro Tag. In vielen Fällen dominiert ein Wochenrhythmus mit verminderter Schwall- und Sunk Aktivität während den Wochenenden. Die «Niederwasserphase» zwischen zwei Schwallimpulsen wird Sunk genannt.

In der Regel treten Schwall-Sunk Phänomene am deutlichsten in den Wintermonaten zu Tage, da einerseits zu dieser Jahreszeit in alpinen Einzugsgebieten Niederwasserhältnisse herrschen und andererseits infolge der erhöhten Stromnachfrage in den Speicherkraftwerken grosse Wassermengen turbinieren werden. Zwar wird bei vielen Speicherkraftwerken auch im Sommer turbinieren, aber erstens handelt es sich meist um geringere Mengen und zweitens ist der Basisabfluss in dieser Jahreszeit wesentlich grösser als im Winter. Aus diesen Gründen sind die Schwall-Sunk Erscheinungen üblicherweise in den Sommermonaten weniger markant.

Abb. 1 > Schwall und Sunk am Beispiel des Inn bei Martinsbruck.

Dargestellt ist die Woche vom 26. Januar bis zum 1. Februar 2001.



Schwallabflüsse treten im Gegensatz zu natürlichen Hochwasserabflüssen regelmässig und viel häufiger auf¹. Charakteristisch für die kraftwerksbedingten Schwallspitzen ist der gegenüber natürlichen Hochwässern deutlich raschere Abflussrückgang. In Abb. 1 sind Schwall- und Sunkphasen an einem Beispiel veranschaulicht. Deutlich erkennbar sind auch die Unterschiede der Schwall- Sunk Aktivität zwischen Wochenenden und

¹ Auch sind Schwallabflüsse deutlich geringer als Hochwasserabflüsse, in der Regel liegen sie in der Grössenordnung des ein- bis zweifachen des mittleren jährlichen Abflusses (MQ)

Wochentagen. Man erkennt ebenfalls den (Rechtecks-)Impulscharakter, der insbesondere unmittelbar nach dem Kraftwerk vorherrschend ist. Weiter flussab erfolgt durch hydraulische Retention langsam eine Verformung des Schwallimpulses.

1.3 Ausgangssituation – Schwall-Sunk in der Schweiz

Wasserkraftwerke mit Schwallbetrieb stehen immer im Zusammenhang mit Speichern. Sie werden aus einem Speichersee alimentiert, seien es die grossen Jahresspeicher (vorwiegend im alpinen Raum) oder Wochen- und Tagesspeicher in den voralpinen und jurassischen Regionen. Beeinflusst durch Schwall-Sunk sind hauptsächlich die grösseren und mittleren Talflüsse in den Alpen und Voralpen (Meile et al., 2005). Die Seen im Alpenvorland vermögen die zufließenden Schwallimpulse vollständig «wegzufiltern». Eine gesamtschweizerische Übersicht über die durch Schwall-Sunk betroffenen Fließgewässerstrecken bieten Margot et al. (1992).

Der Speicherbau hatte seine Blüte von 1950 bis 1970. Es war folglich seit dieser Periode, dass Schwall-Sunk Phänomene in der Schweiz in grösserem Ausmasse in Erscheinung getreten sind. Damit verbundene ökologische Probleme haben ihre Wurzeln in dieser Zeit. Danach fand der weitere Speicherausbau nur mehr in geringem Umfang statt. Wird nun die Hypothese in den Raum gestellt, dass Schwall-Sunk Phänomene in den letzten 20–30 Jahren zugenommen haben, ist festzuhalten, dass keine neuen Gewässerstrecken durch Schwall betroffen sind. Die Länge der schwallbeeinflussten Gewässerstrecken hat nicht zugenommen. Allenfalls– und dies ist Gegenstand der Analyse – haben sich Art und Ausmass der Schwallphänomene verändert. Als mögliche Gründe dafür können genannt werden: Installation neuer Turbinen (beispielsweise mit grösserem Schluckvermögen), neue Restwasservorschriften (beispielsweise geringeres Schwall-Sunk Verhältnis aufgrund geänderter Dotationsmengen), veränderte Betriebsführung (zum Beispiel kurzfristigere Reguliertätigkeit wegen verstärktem Bedarf an Regel- und Spitzenstrom), Ausfall von Maschinensätzen (Revisionsarbeiten, Unfälle, Beispiel Kraftwerke Nendaz im Wallis im Dezember 2000), hydroklimatische Variabilität (beispielsweise Veränderungen der Niederwasserabflüsse) etc.

1.4 Zielsetzung

Das Ziel war es, Veränderungen und Trends in Schwall-Sunk Merkmalen seit den 1970er-Jahren bis heute zu erkennen und qualitativ zu beschreiben. Zentral für die Wahl der Merkmale waren ihre Aussagekraft und ihre ökologische Relevanz. Anhand der Untersuchung einer geeigneten Auswahl beeinflusster Gewässerstellen sollte ein möglichst repräsentatives Bild über die Verhältnisse in der gesamten Schweiz ermittelt werden. Aufgrund der Resultate der Analysen sollte zudem die eingangs formulierte These überprüft werden.

2 > Schwall-Sunk: seine ökologische Relevanz

Auf die ökologische Bedeutung von Schwall-Sunk wird hier nicht vertieft eingegangen, dazu wird auf die vorhandene Literatur verwiesen (zum Beispiel Fiber, 2005; Limmex, 2004; Weber, 2005). In BUWAL (2003) werden die Auswirkungen des Schwallbetriebs auf den Makrozoobenthos- und den Fischbestand aufgezeigt. Dort ist für die Mehrzahl der untersuchten schwallbeeinflussten Fließgewässer eine Beeinträchtigung der aquatischen Organismen festgestellt worden. Im Folgenden wird nur ein Streiflicht auf einige Wirkungen geworfen.

Der Schwallfluss kann verschiedene gewässerökologische Auswirkungen wie zum Beispiel eine verminderte Individuendichte, veränderte Lebensgemeinschaften, ein reduziertes Nahrungsangebot oder geringeres Wachstum zur Folge haben. Bei starkem hydraulischem Stress (markante und häufige Schwall-Sunk Wechsel) wird das Zoo-benthos massenhaft und unkontrolliert weggespült, besonders wenn das Phytobenthos durch die starke Strömung abgerissen wird. In solchen Fällen spricht man von so genannter Katastrophendrift. Während Schwallereignissen wurde in vielen Gewässern eine erhöhte Trübung des Wassers beobachtet, was zur Kolmation der Gerinnesohle führen kann. Während Sunkphasen besteht besonders in naturnahen Gewässern mit breiten Fließquerschnitten (mit flachen Uferzonen) die Möglichkeit, dass Randbereiche der Gewässer trocken fallen. Bei zu raschem Pegelrückgang kann dies zum Stranden von Jungfischen führen. Besonders markant treten die Schwallimpulse in den Wintermonaten auf, eine Periode, welche im alpinen Raum einer «natürlichen Ruhephase» entspricht, während der die Laichentwicklung stattfindet. Diese wird durch Schwallbetrieb gestört. Eine weitere Begleiterscheinung von schwallerzeugenden Kraftwerken sind Temperaturschwankungen mit negativen Auswirkungen auf Fischeier und Jungfische. Das turbinierte Wasser aus den Stauseen wärmt das Fließgewässer im Winter auf. Im Sommer werden die Fließgewässer durch den Kraftwerksbetrieb abgekühlt. Ökologisch gravierender als die saisonale Veränderung der Wassertemperatur werden jedoch die kurzfristigen Temperaturschwankungen des Schwallbetriebes eingeschätzt (Meile et al., 2005).

Zurzeit existieren keine konsolidierten, allgemein anerkannten Schwall-Merkmale mit entsprechenden ökologisch orientierten Schwellen- oder Richtwerten. Es bestehen auch keine expliziten gesetzlichen Regelungen. In der einschlägigen Literatur werden in dieser Beziehung das Schwall-Sunk Verhältnis sowie Anstiegs- und Rückgangsraten am meisten genannt. Für ersteres wird zum Beispiel der Bereich 3:1 bis 5:1 aufgeführt (BMLF, 2004), ab dem erhebliche ökologische Auswirkungen zu erwarten sind. Für letztere enthält BUWAL (2003) einige Anhaltswerte, allerdings streuen die Angaben stark.

Die tatsächliche ökologische Wirkung hängt neben den rein hydrologischen Aspekten auch von weiteren Faktoren wie etwa den morphologischen Gegebenheiten des betroffenen Gewässers ab.

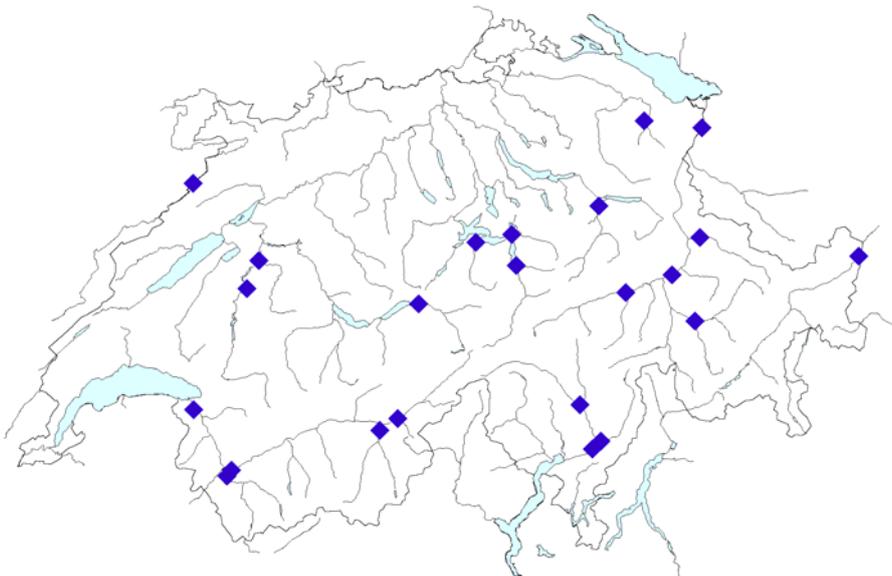
3 > Datengrundlage

3.1 Auswahl der Untersuchungsstellen

Die Analyse wurde auf der Grundlage von Abflussmessdaten des hydrometrischen Messnetzes des BAFU durchgeführt. 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. Manche Stationen in unmittelbarer Nähe zum schwallauslösenden Kraftwerk und unterhalb einer Restwasserstrecke 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. Eine dritte Gruppe von Stationen zeichnet Mischsignale aus der Überlagerung der Einzelsignale von mehreren flussauf gelegenen Kraftwerken auf.

Tabelle 1 listet die Namen sowie Zusatzinformationen zu den insgesamt 23 ausgewählten und untersuchten Stationen auf. Abb. 2 zeigt die räumliche Verteilung dieser Stationen.

Abb. 2 > Karte der analysierten Stationen aus dem eidgenössischen hydrometrischen Messnetz.



Tab. 1 > Liste der verwendeten eidgenössischen Messstationen.

ID	Stationsname	x-Koord.	y-Koord.	Periode	Automatisiert seit	Bemerkungen
2019	Aare-Brienzwiler	649930	177380	1974–2005	1993	
2141	Albula-Tiefencastel	763420	170145	1974–2005	1993	
2270	Doubs-Combe des Sarrasins	557530	227320	1974–2005	-	
2481	Engelberger-Aa-Buochs	673555	202870	1983–2005	1992	
2053	Drance-Martigny	571280	105680	1991–2005	2002	verlegt am 1.10.2002
2067	Inn-Martinsbruck	830640	197190	1974–2005	1993	
2150	Landquart-Felsenbach	765365	204910	1974–2005	1993	
2372	Linth-Mollis	723985	217965	1974–2005	1992	
2420	Moesa-Lumino	724765	120360	1977–2005	2002	Datenlücke 1979–1980
2084	Muota-Ingenbohl	688230	206140	1974–2005	1992	
2056	Reuss-Seedorf	690085	193210	1974–2005	1993	
2473	Rhein-Diepoldsau	766280	250360	1974–2005	1993	vor 1984 Schmitter
2602	Rhein-Domat/Ems	753890	189370	1974–2005	1993	vor 1989 Felsberg
2024	Rhône-Branson	573150	108300	1974–2005	1993	
2346	Rhone (Rotten)-Brig	641340	129700	1974–2005	1995	
2009	Rhône-Porte du Scex	557660	133280	1974–2005	1993	
2215	Saane-Laupen	584440	195300	1974–2005	1999	
2119	Sarine-Fribourg	579420	183670	1974–2005	1994	
2468	Sitter-St. Gallen	742540	253230	1981–2005	1994	
2020	Ticino-Bellinzona	721245	117025	1974–2005	1992	
2494	Ticino-Pollegio	716120	135330	1987–2005	1994	
2351	Vispa-Visp	634150	124850	1974–2005	1994	
2033	Vorderrhein-Ilanz	735000	182030	1974–2005	1992	

3.2 Verwendete Daten

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. Die Frage der verwendeten Daten und deren Eignung ist daher fundamental.

Zu den ausgewählten Stationen sind kontinuierliche Abfluss- und Wasserstandsdaten in der Regel seit 1974 in digitaler Form vorhanden. Dazu ist zu sagen, dass diese «nachdigitalisiert» wurden, d.h. dass die im Pegelhaus registrierten Hydrographen-Streifen in einem späteren Schritt manuell digitalisiert wurden. Da der «zeitliche Vorschub» auf den Papierstreifen relativ gering ist, resultiert bei der Nachdigitalisierung hinsichtlich zeitlicher Auflösung eine gewisse Unschärfe. Je nach Merkmal (im Speziellen 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 oder 1993) 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 Merkmalen den Vergleich. Bei vielen Fällen der konsultierten Schwall-Literatur liegt Stundenauflösung vor.

Tabelle 1 gibt zu den ausgewählten Stationen an, ab wann eine automatisierte digitale Datenaufzeichnung und damit effektiv 10-min Werte vorliegen.

3.3 Abfluss- und Wasserstandsdaten

Die untersuchten Merkmale basieren auf Abflussdaten. Damit ist eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Stationen gegeben, da der Wasserstand von den lokalen geometrischen Verhältnissen abhängt. Einzig für die Anstiegs- und Rückgangsraten wurden Pegelstandsdaten verwendet, da Raten in cm/min intuitiv besser fassbar sind und in der Literatur Werte zu diesem Schwall-Sunk Merkmal meist in dieser Einheit angegeben werden.

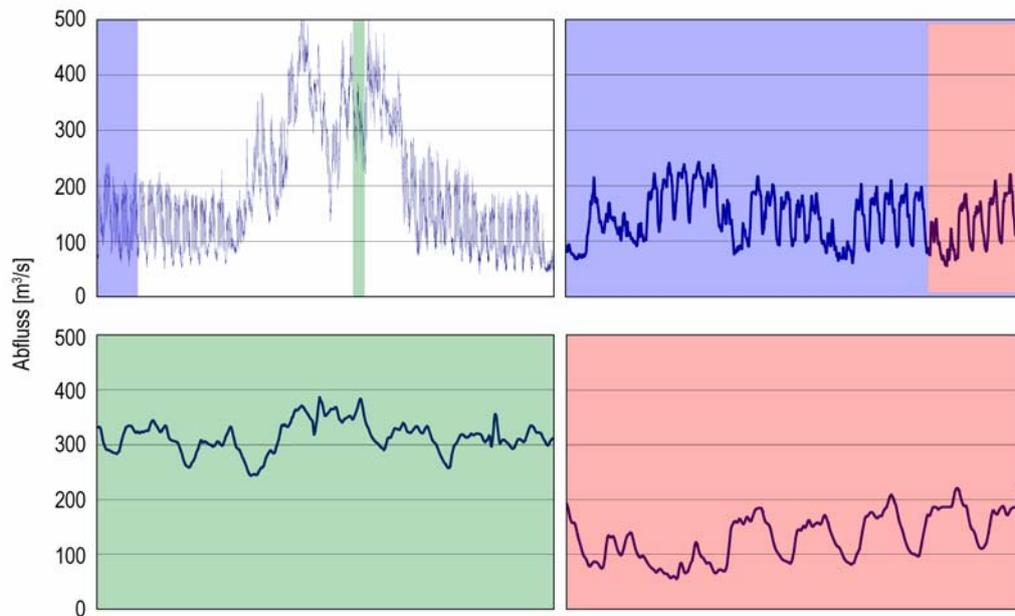
3.4 Wahl des Zeitfensters

In einer Vorstudie wurden die Jahresganglinien des Abflusses an den untersuchten Messstationen erstellt und einer visuellen Kontrolle unterzogen. Der damit verfolgte Zweck war die Identifizierung geeigneter Zeitperioden («Zeitfenster»), zu welchen die Schwall-Sunk Phänomene möglichst ungestört hervortreten. Ungestört heisst in diesem Zusammenhang, dass das «Signal» aus der Einleitung des turbinierten Wassers der Schwall-auslösenden Wasserkraftwerke den Gesamtabfluss dominiert und nur in geringem Umfang durch natürlichen Abfluss (sei es Basisabfluss, sei es Hochwasserabfluss) überlagert wird. Zu diesem Zweck wurde «zeitlich gezoomed». Es wurden einerseits Grafiken des Abflussgeschehens im Monat Januar und dann nochmals fokussiert in der letzten Januarwoche betrachtet. Andererseits wurde der Abflussgang der letzten Juliwoche für alle ausgewählten Stationen betrachtet, um damit einen Eindruck über das Abflussgeschehen im Sommer zu bekommen.

Ausgehend von der visuellen Überprüfung wurde entschieden, als Zeitfenster für die anschliessenden Analysen den Monat Januar zu wählen. Im alpinen Raum herrschen zu dieser Zeit natürlicherweise Niederwasserverhältnisse (Pfaundler und Wüthrich, 2006), gleichzeitig ist der Strombedarf hoch. Deshalb dominiert der Einfluss von Schwall und Sunk die Abflussganglinien in diesem Monat und weist nur wenig «Rauschen» aus natürlichen Abflüssen auf, womit günstige Voraussetzungen für die Untersuchungen gegeben sind.

Abb. 3 > Grafiken mit Abflussganglinien der Station Rhône-Porte du Scex aus dem Jahr 2003.

*Jahresgrafik (oben links), Monatsgrafik Januar (oben rechts),
Grafik letzte Woche Juli (unten links) und Grafik letzte Woche Januar (unten rechts).*



Zwar zeigen viele Stationen auch im Sommer Schwall- und Sunk Aktivitäten, diese sind aber in ihrem Ausmass in der Regel deutlich weniger markant, vor allem sind die Schwallabflüsse neben dem – durch das natürliche Abflussregime – erhöhten Basisabfluss sowie den Hochwasserereignissen nur eine Komponente des Gesamtabflusses. Da das Schwallsignal sich nur schlecht und mit Unsicherheit vom restlichen Abfluss trennen lässt, eignen sich die Abflussganglinien in dieser Jahreszeit schlecht für den vorliegenden Zweck.

Das geschilderte Vorgehen ist in Abb. 3 beispielhaft für die Rhône bei Porte du Scex im Jahr 2003 dargestellt. Die Rhône bei Porte du Scex weist ein alpines Regime auf. Deshalb ist der Jahresgang des Abflusses von einem ausgeprägten Sommermaximum gekennzeichnet. In der Monats- und Wochengrafik des Januars sind die charakteristischen Schwall- und Sunk Erscheinungen deutlich erkennbar. Im Sommer ist das Phänomen etwas weniger ausgeprägt. Beispiele für die weiteren verwendeten Stationen sind im Anhang I enthalten.

Aus der Betrachtung der Jahresganglinien zeigt sich, dass die Verhältnisse im Januar in etwa repräsentativ für die Periode Ende November bis ca. März sind. Auch ökologisch ist diese Periode relevant, da in dieser natürlicherweise hochwasserfreien Ruhephase die Laichentwicklung stattfindet.

Für die wenigen nicht-alpinen Stationen (im Alpenvorland und im Jura), für welche das Gesagte nicht zutrifft und der Winter keine ausgeprägte Niederwasserzeit darstellt, wurde zum Teil eine andere Zeitperiode für die Analyse zugrunde gelegt. Dabei wurde danach getrachtet, dass es sich ebenfalls um eine Niederwasserphase handelt und die Abflussganglinie keine natürlichen Hochwässer enthält. In den detaillierten Resultaten zu den einzelnen Stationen (siehe Anhang I) ist die verwendete Zeitperiode angegeben.

4 > Schwall-Sunk Merkmale: Definition und Methodik

Im Folgenden werden die Merkmale vorgestellt und die Methodik ihrer Bestimmung dargelegt, welche zur Beschreibung von Schwall-Sunk Aktivitäten herangezogen wurden. Das gestellte Ziel war, die pauschal formulierte These (pro memoria: «*Schwall-Sunk Phänomene haben in den letzten 20–30 Jahren zugenommen*») differenziert anhand verschiedener Aspekte zu beleuchten. Die Auswahl war auch vom Wunsch getragen, Charakteristika mit vermuteter «ökologischer Relevanz» zu berücksichtigen (abgeleitet aus Zitierungen in einschlägiger Literatur wie auch aus sachbezogenen Überlegungen). Folgende fünf Merkmale wurden untersucht:

- > Schwallabfluss
- > Schwall-Sunk Verhältnis
- > Pegelanstiegs- und -rückgangsraten
- > Anzahl Schwallspitzen pro Tag
- > Volatilität

Das Phänomen Schwall-Sunk stellt einen Wechsel zwischen zwei Zuständen dar (Schwall- und Sunkphase). Merkmal 1 ist 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.

4.1

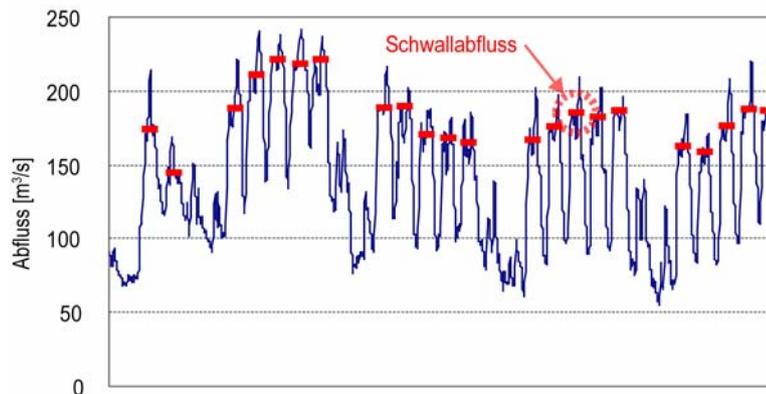
Merkmal 1: Schwallabfluss

Das erste untersuchte Merkmal ist wohl das offensichtlichste Merkmal zur Charakterisierung eines Schwallereignisses und 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 einem Hochwasser oder während den Verhältnissen bei mittlerem Abfluss sind. Dies wiederum gibt Hinweis darauf, ob man im Bereich von potentielltem 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 Schwallabflussganglinie repräsentativ beschreibt². Auf diese Weise wurde für jeden Tag, an dem Schwallbetrieb stattfand, ein Wert aus der Abflussganglinie herausgelesen. Die zugrunde liegende Zeitperiode ist dabei jeweils der Monat Januar. In Abb. 4 ist dieses Vorgehen illustriert. Man erhält somit pro Jahr eine Stichprobe von Schwallabflusswerten.

Abb. 4 > Extrahieren der Schwallabflüsse aus der Abflussganglinie.

Herausgelesen wird nicht das absolute Maximum pro Ereignis, sondern ein «repräsentatives» Niveau eines gedanklich idealisierten Rechteckimpulses.



² Damit sind die Ergebnisse zwar vielleicht « konservativer » als in Studien, welche auf die maximalen Spitzen abstellen, aber in der Aussage auch deutlich robuster.

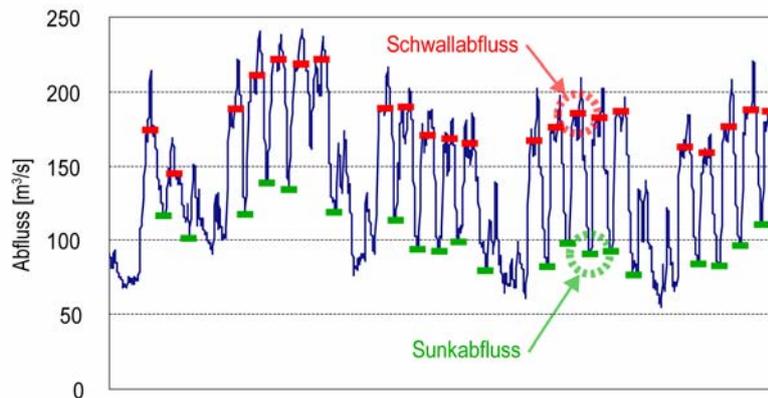
4.2 Merkmal 2: Schwall-Sunk Verhältnis

Dieses Merkmal ist Indikator für die Intensität der Zustandsänderung von Schwall zu Sunk. Es berechnet sich als Verhältniswert zwischen dem Schwallabfluss und dem Sunkabfluss.

Dieses Merkmal wird häufig in der einschlägigen Literatur zur ökologischen Bedeutung von Schwall-Sunk aufgeführt. Studien zu den ökologischen Auswirkungen haben versucht, biologische Auswertungen mit diesem Merkmal in Verbindung zu setzen (BUWAL, 2003 und BMLF, 2004).

Für seine Bestimmung wird pro Schwall-Sunk 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. Auf diese Weise wurde für jeden Tag, an dem Schwallbetrieb stattfand³, das Schwall-Sunk Verhältnis bestimmt. Die zugrunde liegende Zeitperiode ist wie bei Merkmal 1 jeweils der Monat Januar. In Abb. 5 ist dieses Vorgehen illustriert. Man erhält somit pro Jahr eine Stichprobe von Schwall-Sunk Verhältniswerten.

Abb. 5 > Vorgehen beim Herauslesen der Werte für die Schwall- und Sunkabflüsse am Beispiel der Monatsgrafik Januar an der Station Rhône bei Porte du Scex, Jahr 2003.



³ Tritt Schwall-Sunk beispielsweise am Wochenende nicht auf, werden diese Tage nicht berücksichtigt.

4.3

Merkmal 3: Pegelanstiegs- und -rückgangsraten

Dieses Merkmal beschreibt 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 Erwähnung⁴.

Für die vorliegende Analyse wurde bei der Bestimmung der Anstiegs- und Rückgangsraten so vorgegangen, dass aus der Zeitreihe der Pegelstandsreihe (P) eine Datenreihe mit Pegeländerungsraten (PR) abgeleitet wurde:

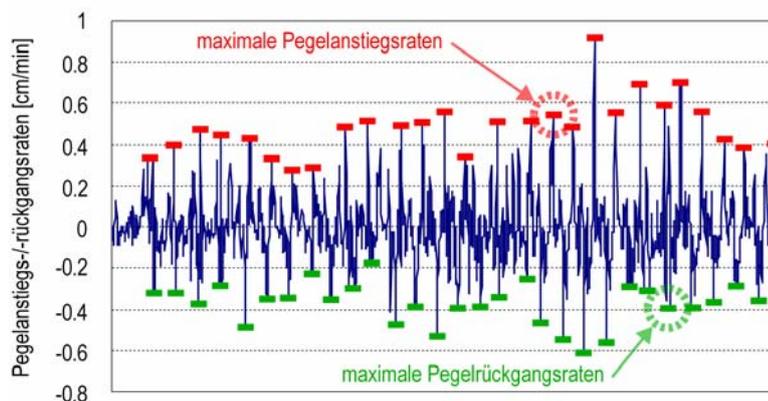
$$PR_t = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{P_t - P_{t-1}}{\Delta t}$$

Die Raten können sowohl positive, wie auch negative Werte annehmen. Positive Werte bedeuten Pegelanstiege, negative Werte Pegelrückgänge. Aus der so abgeleiteten Datenreihe wurden die maximalen (=Anstiegsraten) und minimalen (=Rückgangsraten) Pegelraten herausgelesen.

Die zugrunde liegende Zeitperiode ist wie bei den ersten beiden Merkmalen jeweils der Monat Januar. In Abb. 6 ist das Vorgehen illustriert. Man erhält pro Jahr eine Stichprobe von Pegelanstiegs- und -rückgangsraten.

Zu diesem Merkmal ist zu bemerken, dass mit den Auswertungen erst ab dem Jahr begonnen wurde, ab welchem die Abflussmessstation mit automatischer Datenerfassung ausgestattet wurde (siehe Tabelle 1) und damit von ausreichender Zuverlässigkeit der zeitlichen Auflösung ausgegangen werden konnte. Da genau dieser zeitliche Aspekt die Natur dieses Merkmals ist, spielt die zeitliche Auflösung der Daten hier eine fundamentale Rolle, während bei den anderen Merkmalen die Abflussgrösse im Zentrum des Interesses steht. Aus diesem Grund reicht die Anzahl an betrachteten Jahren weniger weit in die Vergangenheit, als bei den anderen Merkmalen.

Abb. 6 > Vorgehen beim Herauslesen der Maximalwerte der Pegelanstiegs- und -rückgangsraten am Beispiel der Monatsgrafik Januar der Rhône bei Porte du Scex, Jahr 2003.

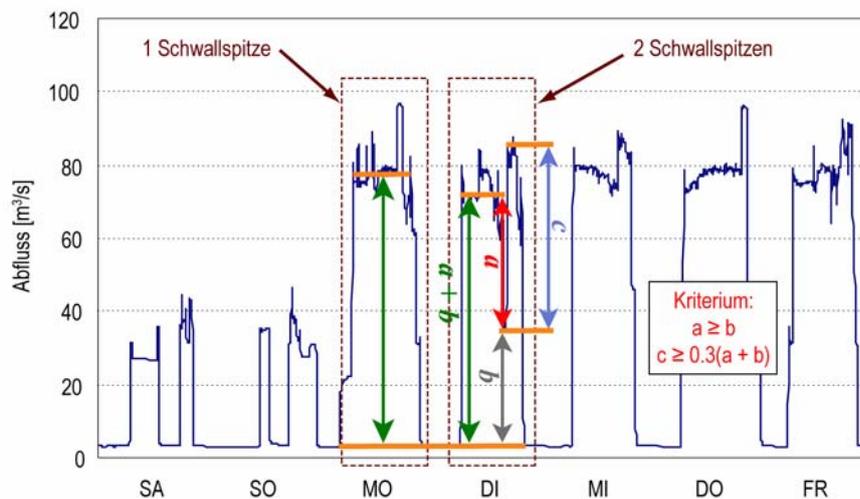


⁴ Insbesondere wird hierbei oft bei zu raschem Rückgang das Stranden von Jungfischen auf trocken fallenden Vorländern erwähnt.

4.4 Merkmal 4: Anzahl Schwallspitzen pro Tag

Manche Kraftwerke werden so betrieben, dass nicht nur eine, sondern zwei oder mehrere Schwallphasen pro Tag resultieren. Das Merkmal 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 um mehr als 50 Prozent dieser ersten Schwallspitze zurück geht und anschliessend wieder um mindestens 30 Prozent derselben ansteigt, dann ist eine zusätzliche, eigenständige Schwallspitze zu zählen. Analog wird auch bei mehr als zwei Schwallspitzen pro Tag verfahren. Die Definition einer eigenständigen Schwallspitze ist in Abb. 7 am Beispiel des Inn bei Martinsbruck im Januar 2003 veranschaulicht. Als Analysezeitraum wurden jedes Jahr die Tage der letzten Januarwoche verwendet und aus dieser Stichprobe der ganzzahlig gerundete Mittelwert berechnet. Es ergibt sich ein Wert pro Station und Jahr.

Abb. 7 > Definition einer eigenständigen Schwallspitze am Beispiel der Abflussganglinie letzte Woche Januar 2003 am Inn bei Martinsbruck.

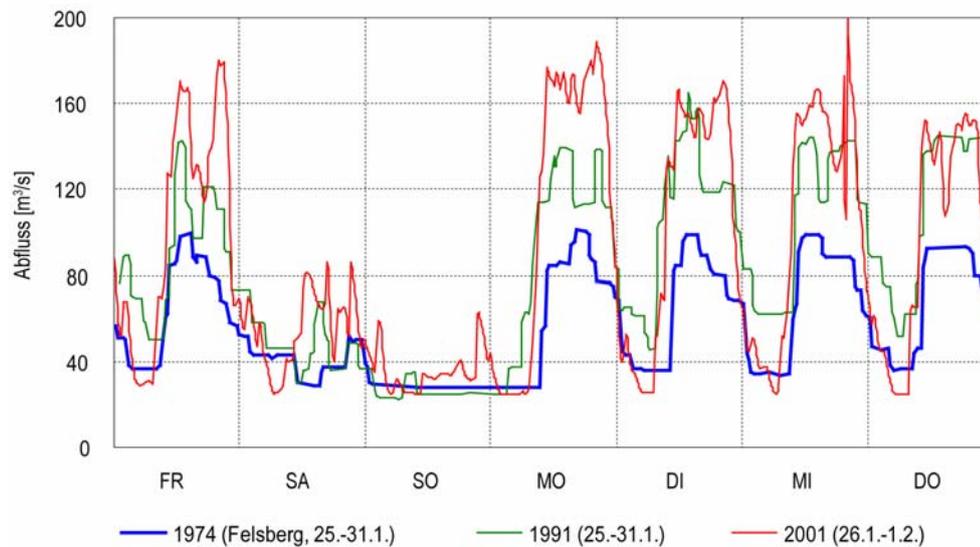


4.5

Merkmal 5: Volatilität

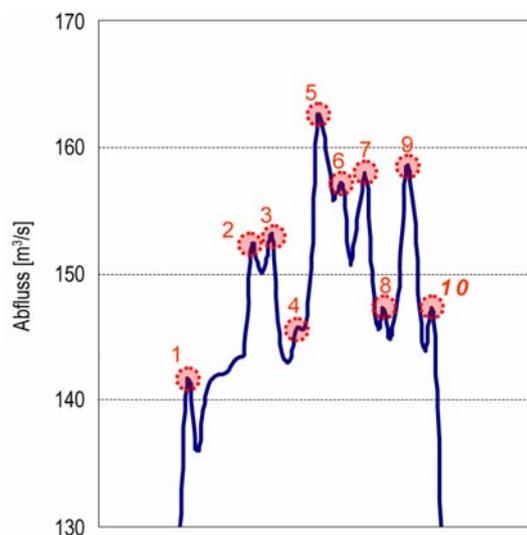
In vielen Fällen treten zwar nicht mehrere eigenständige Schwallspitzen pro Tag auf, aber es zeigen sich in den Abflussganglinien starke Schwankungen während eines Schwallereignisses, welche durch die Reguliertätigkeit seitens des Kraftwerkbetriebes verursacht werden. Dieses Merkmal wird als «Volatilität» bezeichnet und durch die Anzahl an Abflussschwankungen über einen Tag hinweg ausgedrückt. Diesem Merkmal wird keine ökologisch herausragende Bedeutung zugewiesen, da es die Schwankungshäufigkeit «innerhalb eines Zustandes» (Schwallphase) erfasst. Dies wird ökologisch als weniger gravierend erachtet als es bei Merkmal 4 der Fall ist. Letzterer gibt die Häufigkeit grundsätzlicher Abflusszustandsänderungen wieder und kann somit als Indikator für hydraulischen Stress angeführt werden. Trotzdem wird das Merkmal Volatilität berücksichtigt, analysiert und dokumentiert, weil bei der visuellen Erstbeurteilung der Abflussganglinien Änderungen in der Form der Schwallimpulse aufgefallen sind. In Abb. 8 ist dies am Beispiel des Alpenrhein bei Domat/Ems ersichtlich. Es ist auch verschiedentlich die These postuliert worden, dass als Folgeerscheinung der Liberalisierung des Strommarktes und des zunehmend kurzfristig ausgerichteten Handels an den Elektrizitätsbörsen die Reguliertätigkeit der Speicherkraftwerke zugenommen hat.

Abb. 8 > Illustration zu Veränderungen in der Form der Schwall-Abflussganglinien am Beispiel Alpenrhein bei Domat/Ems.



Bestimmt wird die Ausprägung dieses Merkmals durch die Anzahl an Abflussschwankungen während eines Tages, unabhängig von der Grösse der Schwankung. Es wird also die Anzahl an Schwallspitzen wie bei Merkmal 4 und zusätzlich die kleineren Schwankungen innerhalb der Schwallphasen gezählt. Als zeitliche Grundlage für die Erhebung dieses Merkmals wurde die letzte Januarwoche gewählt. Aus den Tageswerten dieser Woche wurde dann das gerundete Mittel als Ausprägung des Merkmals Volatilität übernommen. Ein Illustrationsbeispiel zur Erhebung der Anzahl Schwankungen pro Tag ist in Abb. 9 enthalten. Als ergänzende Bemerkung ist festzuhalten, dass die Auswertungen zu diesem Merkmal nicht erst seit automatischer Datenerfassung an den Abflussmessstationen, sondern seit der Verfügbarkeit digitaler Daten (in der Regel ab 1974) gemacht worden sind. Vor dem Zeitpunkt der automatischen Datenerfassung war die «Datendichte», das heisst die Anzahl an Datenpunkten pro Zeiteinheit teilweise geringer. Somit könnten einzelne Schwankungen aufgrund der in den Anfangsjahren dünneren Datendichte schlechter erfasst worden sein. Eine Kontrolle der nachdigitalisierten Hydrographenstreifen zeigte aber, dass dies keine wesentliche Änderung der gemäss oben beschriebenen Verfahrens gewonnenen Aussagen nach sich zieht. Ab dem Zeitpunkt der automatischen Erfassung liegt aber jedenfalls diesbezügliche Datenhomogenität vor.

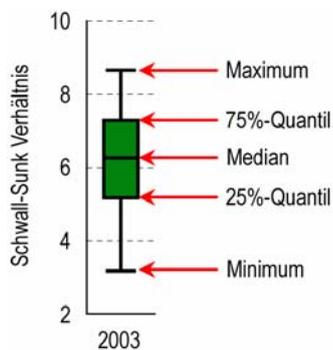
Abb. 9 > Erhebung der Anzahl Schwankungen pro Tag für das Merkmal Volatilität am Beispiel eines Tages im Januar 2003 am Alpenrhein bei Domat/Ems.



5 > Aufbereitung der Ergebnisse und Darstellung

Aufgrund der grossen Variabilität in der Merkmalsausprägung der erfassten Merkmale resultiert nicht ein Wert pro Merkmal und Jahr, sondern eine Stichprobe. Während bei Merkmal 4 und 5 daraus ein Mittelwert pro Jahr berechnet wurde, war das Ziel bei der Darstellung der Ergebnisse zu den Merkmalen 1 bis 3, diese Variabilität explizit zu veranschaulichen. Denn trendhaftes Verhalten bedeutet nicht nur Veränderungen der Mittelwerte, sondern auch der Variabilität eines Merkmales. Als geeignete Darstellungsform für die Verteilung der Werte pro Merkmal und Jahr wurden Box-Plots gewählt. Es kann damit sowohl der häufigste Fall der Merkmalsausprägung als auch die extremsten Merkmalswerte sowie die Spannweite visualisiert werden. Abb. 10 illustriert dazu in einer Skizze diese Darstellungsform.

Abb. 10 > Box-Plots als Darstellungsform der Verteilung der Merkmalswerte innerhalb eines Jahres.

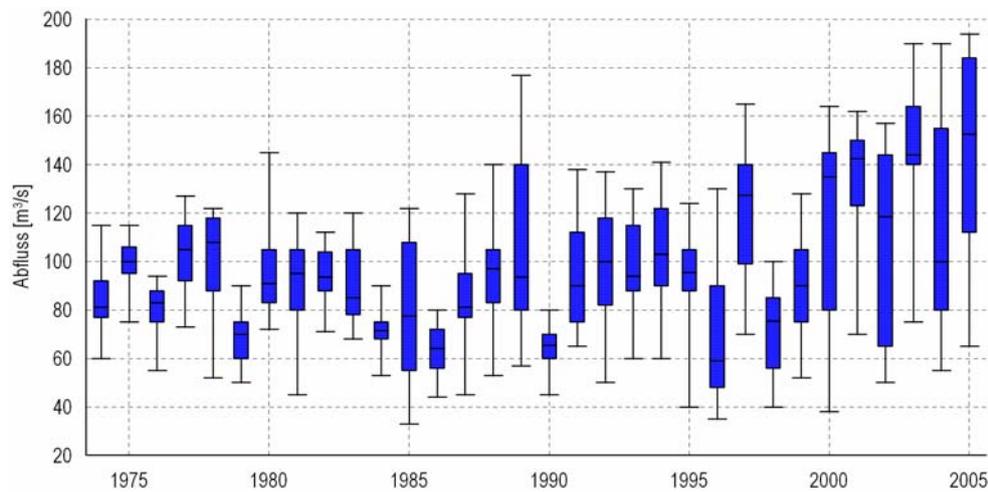


Damit liegen pro analysierte Messstation folgende Grafiken als Resultat der Auswertungen vor:

Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Schwallspitzenabflüsse seit Verfügbarkeit digitaler Abflussganglinien (in der Regel 1974–2005), vgl. Abb. 11.

ad Merkmal 1

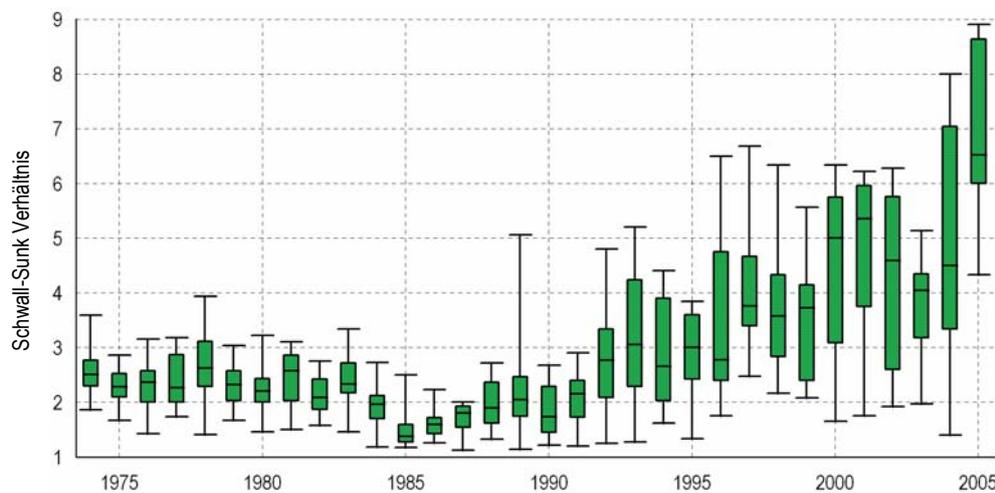
Abb. 11 > Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Schwallabflüsse jeweils im Monat Januar; Periode 1974 bis 2005 am Alpenrhein bei Domat/Ems (1989–2005) und Felsberg (1974–1988).



Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Schwall-Sunk Verhältnisse seit Verfügbarkeit digitaler Abflussganglinien (in der Regel 1974–2005), vgl. Abb. 12.

ad Merkmal 2

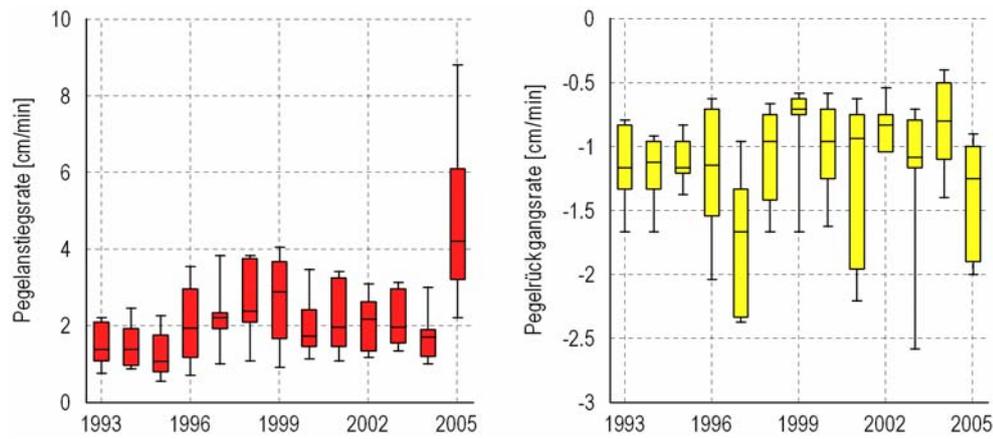
Abb. 12 > Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Schwall-Sunk Verhältnisse jeweils im Monat Januar; Periode 1974 bis 2005 am Alpenrhein bei Domat/Ems (1989–2005) und Felsberg (1974–1988).



Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Pegelanstiegs- und -rückgangsraten seit Beginn der automatischen Datenregistrierung (in der Regel 1992–2005), vgl. Abb. 13.

ad Merkmal 3

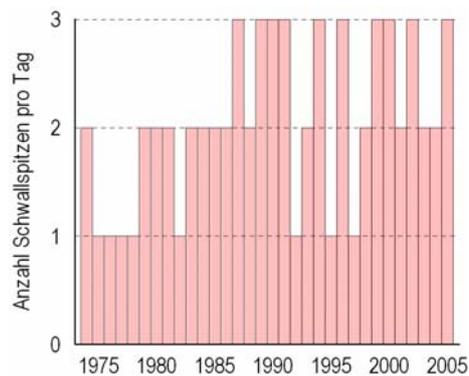
Abb. 13 > Box-Plot Grafiken zur Entwicklung der Pegelanstiegsraten (links) und Pegelrückgangsraten (rechts) jeweils im Monat Januar; Periode 1993 bis 2005 am Alpenrhein bei Domat/Ems.



Histogramme zur Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl an Schwallspitzen pro Tag seit Verfügbarkeit digitaler Abflussganglinien (in der Regel 1974–2005), vgl. Abb. 14.

ad Merkmal 4

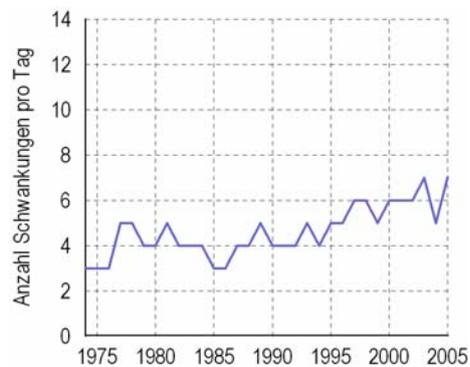
Abb. 14 > Histogramm zur Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl an Schwallspitzen pro Tag in der jeweils letzten Januarwoche; Periode 1974 bis 2005 an der Aare bei Brienzwiler.



Grafiken zur Entwicklung der Volatilität (= durchschnittliche Anzahl an Abflussschwankungen pro Tag) seit Verfügbarkeit digitaler Abflussganglinien (in der Regel 1974–2005), vgl. Abb. 15.

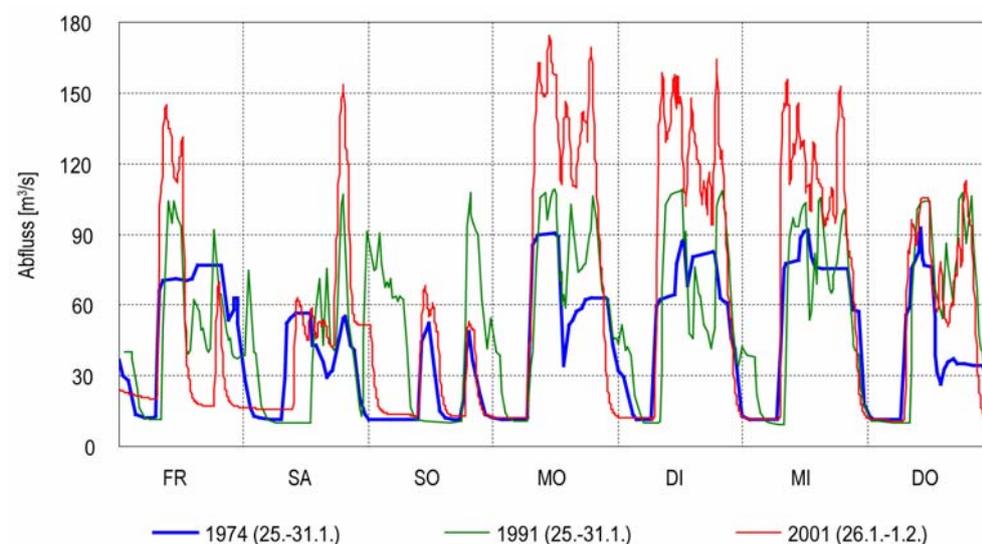
ad Merkmal 5

Abb. 15 > Entwicklung der Volatilität in der jeweils letzten Januarwoche; Periode 1974 bis 2005 am Alpenrhein bei Domat-Ems (1989–2005) und Felsberg (1974–1988).



Neben der Visualisierung der aus den Abflussganglinien abgeleitete Merkmalswerte wurden zur unmittelbaren Veranschaulichung auch Grafiken mit überlagerten Abflussganglinien verschiedener Jahrgänge erzeugt. Während durch die Merkmale einzelne Aspekte der Ganglinie erfasst werden, sind aus den überlagerten Ganglinien Veränderungen in ihrer Gesamtheit ersichtlich. Zugunsten der Übersicht wurden allerdings nicht mehr als drei Jahrgänge direkt (in derselben Grafik) verglichen. Als Illustrationsbeispiel dient Abb. 16 für die Saane bei Laupen.

Abb. 16 > Überlagerte Abflussganglinien der jeweils letzten Januarwoche für drei Jahrgänge (1974, 1991 und 2001) an der Saane bei Laupen.



Für jede der 23 analysierten Abflussmessstationen wurden aus den Analysen die exemplarisch vorgestellten Auswertegrafiken erstellt. Im Anhang I ist pro Messstation ein «Steckbrief» aufgeführt, der die Zusammenstellung der Grafiken enthält. Neben den Darstellungen zur Entwicklung der Merkmale sind in Anhang I zusätzlich Abbildungen mit verschiedensten Abflussganglinien aller Messstationen enthalten, um das Gesamtbild abzurunden.

6 > Synthese

Während die Grafiken zu den einzelnen analysierten Merkmalen eine sehr detaillierte Einschätzung pro untersuchte Messstation erlauben, erschwert die Vielfalt an Information eine Gesamtbeurteilung. Die Zielsetzung der Studie ist aber genau die schweizweite Perspektive zur Einschätzung der Veränderung von Schwall-Sunk Phänomenen. Deswegen wurde in einem Syntheseschritt versucht, die Detailinformationen in eine generalisierte Aussage pro Station zu aggregieren und das Ensemble der Stationen darzustellen. Das Vorgehen zu diesem Zweck war so, dass pro Merkmal und Station die Entwicklungstendenz auf der Basis einer visuellen Einschätzung grob klassiert und das Ergebnis daraus für alle untersuchten Stationen in ihrem räumlichen Kontext in einer Schweizer Karte dargestellt wurde. In einem finalen Aggregationsschritt wurde aus der Summe aller Merkmale eine Gesamtklassierung pro Station vorgenommen und die Resultate wiederum kartografisch umgesetzt.

6.1 Klassierung der Veränderungen der Einzelmerkmale

Die Klassierung erfolgte nicht quantitativ sondern mit Hilfe der produzierten Grafiken aufgrund einer visuellen Einschätzung der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Merkmale über die untersuchte Zeitperiode hinweg (siehe Steckbriefe im Anhang I). Für die Merkmale 1 bis 3 wurde eine Einstufung in fünf Klassen (von deutlicher Zunahme des Merkmals bis zu deutlicher Abnahme) vorgenommen. Tabelle 2 zeigt die vorgenommene Klasseneinteilung mit der zugehörigen Farbcodierung. Zusätzlich wurde die Klassierung durch das Attribut «S» ergänzt, wenn sich die beobachtete Veränderung sprunghaft eingestellt hat. Beurteilt wurde für die Klassierung summarisch die Entwicklung der Zentralwerte der Box-Plots wie auch die Veränderung der Variabilität (=Spannweite der Box-Plots).

Tab. 2 > Klassierungstabelle für die Merkmale 1–3.

	deutliche Zunahme
	geringfügige Zunahme
	keine Veränderung
	geringfügige Abnahme
	deutliche Abnahme
S	sprunghafter Trend

Für die Merkmale 4 und 5 erfolgte die Klassierung gemäss dem Schema, welches in Tabelle 3. dargelegt ist. Dieses ist weniger differenziert als bei den ersten drei Merkmalen und enthält zusätzlich die Klasse «V», wenn aufgrund hoher Variabilität keine

Trendaussage gemacht werden konnte. Wiederum erfolgte die Einstufung in eine der Klassen als Folge einer visuellen Einschätzung der zeitlichen Entwicklung der Merkmalswerte aus den zugehörigen Grafiken.

Tab. 3 > Klassierungstabelle für die Merkmale 4 und 5.

	Zunahme
	Abnahme
	keine Veränderung
V	hohe Variabilität

Mit diesen Klassierungsschemata wurden die 23 ausgewählten Messstationen pro Merkmal hinsichtlich ihrer Entwicklungstendenz eingestuft. Das Ergebnis daraus zeigt Tabelle 4.

Tab. 4 > Klassierungsergebnis zu den einzelnen Merkmalen für die 23 analysierten Abflussmessstationen.

Stationsname	Merkmal 1	Merkmal 2	Merkmal 3		Merkmal 4	Merkmal 5
	Schwall-abfluss	Schwall:Sunk	Anstiegsrate	Rückgangsrate	Häufigkeit Schwallspitzen	Volatilität
Aare-Brienzwiler						
Albula-Tiefencastel	S	S				
Doubs-Combe des S.			nicht automatisierte Station			
Drance-Martigny						
Engelberger-Aa-Buochs			S			
Inn-Martinsbruck		S				
Landquart-Felsenbach					V	
Linth-Mollis						
Moesa-Lumino					V	
Muota-Ingenbohl						
Reuss-Seedorf	S			S		
Rhein-Diepoldsau					V	
Rhein-Domat/Ems						
Rhône-Branson						
Rhone (Rotten)-Brig					V	
Rhône-Porte du Scex						
Saane-Freiburg	S	S			V	
Saane-Laupen	S					
Sitter-St. Gallen					V	
Ticino-Bellinzona					V	
Ticino-Pollegio	S					
Vispa-Visp					V	
Vorderrhein-Ilanz		S				

Die kartografische Umsetzung der Einzelmerkmalsklassierung, wie sie in Tabelle 4 aufgeführt ist, zeigt exemplarisch Abb. 17 für das Merkmal 2 (Schwall-Sunk Verhältnis) und Abb. 18 für das Merkmal 4 (durchschnittliche Anzahl an Schwallspitzen pro Tag). Für die weiteren Merkmale finden sich die Kartendarstellungen im Anhang II.

Abb. 17 > Klassierung der Veränderungen zum Merkmal 2.

Schwall-Sunk Verhältnis.

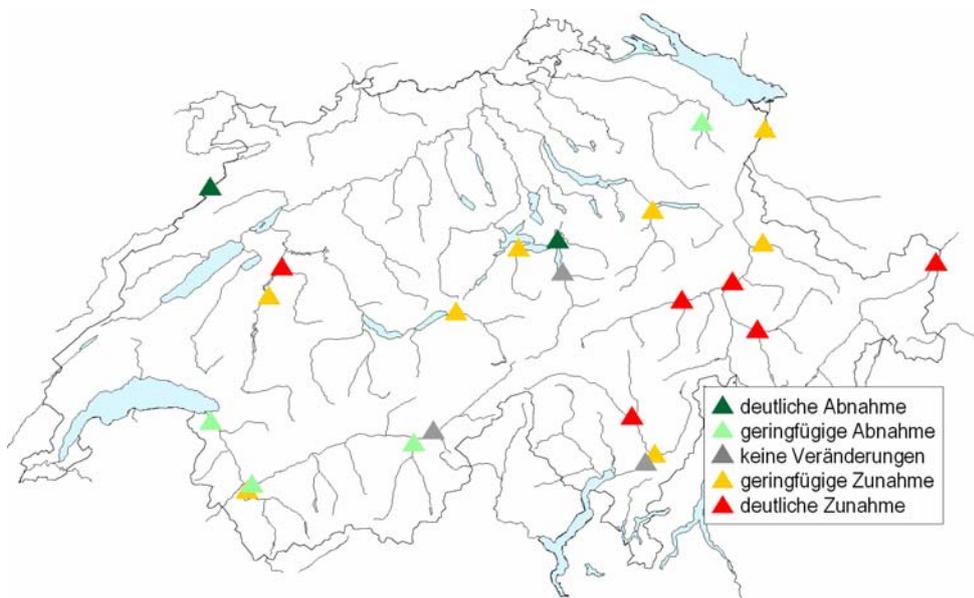
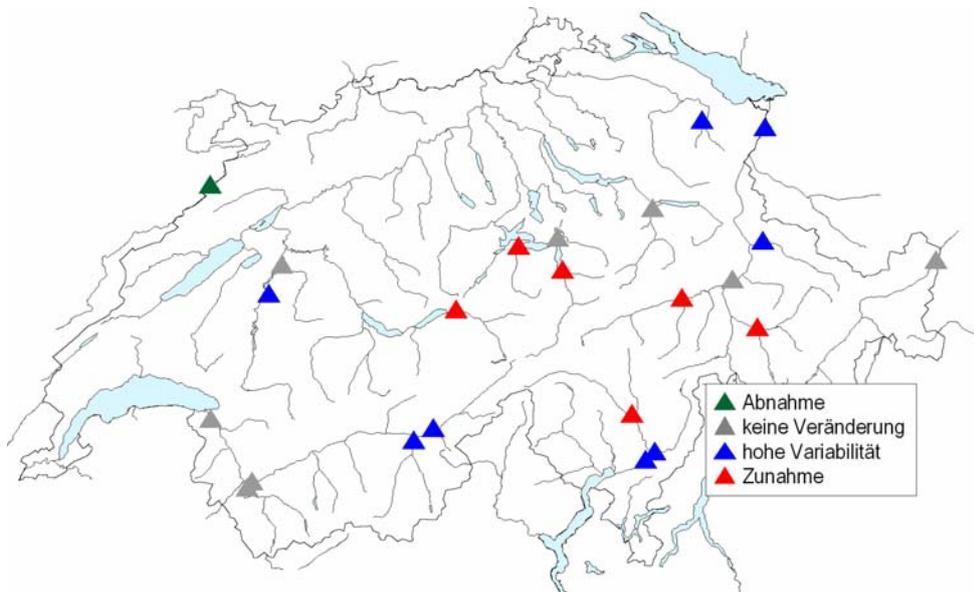


Abb. 18 > Klassierung der Veränderungen zum Merkmal 4.

Durchschnittliche Anzahl an Schwallspitzen pro Tag.



6.2 Summarische Klassierung der Entwicklung der Schwall-Sunk Phänomene

In einem zweiten Aggregationsschritt wurde eine globale, alle untersuchten Einzelmerkmale berücksichtigende Klassierung zur Einstufung der Entwicklung der Schwall-Sunk Phänomene in den letzten 20–30 Jahren durchgeführt. Die Einteilung in fünf Kategorien zeigt Tab. 5.

Tab. 5 > Klasseneinteilung der Gesamtbewertung zur Entwicklung der Schwall-Sunk Phänomene.

	deutliche Verstärkung
	geringfügige Verstärkung
	keine Veränderung
	geringfügiger Rückgang
	deutlicher Rückgang

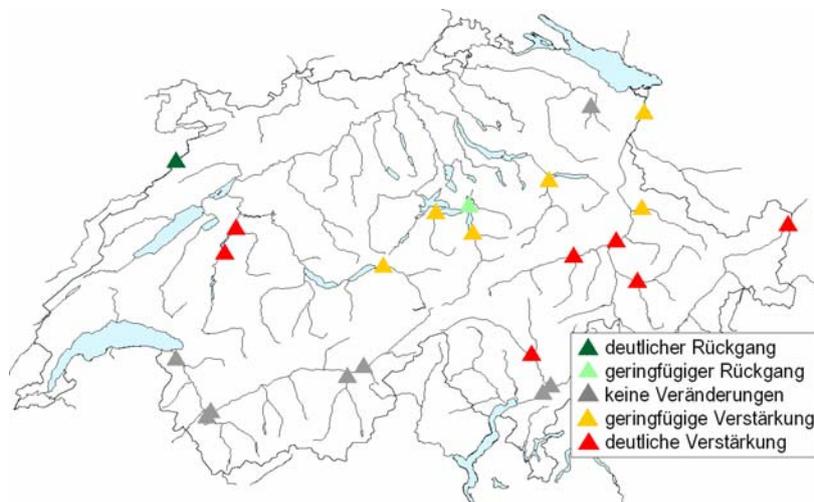
Die Gesamtbeurteilung ist subjektiv und nicht nach streng quantitativen Kriterien erstellt worden. Grundlage dafür ist Tabelle 4 mit den Klassierungsergebnissen zu den Einzelmerkmalen. Die verschiedenen Merkmale fließen aber mit unterschiedlicher Gewichtung, in Abhängigkeit der ihnen beigemessenen ökologischen Relevanz, in die Gesamtbeurteilung ein. Als sehr wichtig erachtet wurden die Merkmale Schwall-Sunk Verhältnis, Pegelanstiegs- und -rückgangsraten sowie durchschnittliche Anzahl Schwallspitzen pro Tag. Etwas weniger stark gewichtet wurden die Schwallabflüsse. Das Merkmal Volatilität spielte keine Rolle, da diesem eine geringe ökologische Bedeutung zugewiesen wurde.

Die Gesamtbeurteilung stützt sich hauptsächlich auf der Entwicklung der als sehr wichtig erachteten Merkmale ab. Wenn mindestens zwei dieser Merkmale eine deutliche Zunahme aufwiesen, dann wurde einer Station bei der Gesamtbeurteilung die Kategorie «deutliche Verstärkung» zugeteilt. Zeigte nur eines der sehr wichtigen Merkmale eine deutliche Zunahme und die anderen nur eine geringfügige Zunahme, dann wurde die betreffende Station der Kategorie «geringfügige Verstärkung» zugeordnet. So wurde beispielsweise die Station Vorderrhein bei Ilanz in die Kategorie «deutliche Verstärkung» eingeteilt, da sowohl das Schwall-Sunk Verhältnis, als auch die Anzahl Schwallspitzen pro Tag eine deutliche Zunahme aufwiesen. Die Einstufung «geringfügige Verstärkung» erfolgte dann, wenn von den als sehr wichtig erachteten Merkmalen mindestens zwei eine geringfügige Zunahme aufwiesen. Die Kategorie «keine Veränderung» wurde zugeteilt, wenn keines der wichtigen Merkmale eine deutliche Zu- oder Abnahme zeigte und gesamthaft keine geringfügige Zu- oder Abnahme die Merkmale dominierte, oder aber, wenn bei den Merkmalen die Klasse «keine Veränderung» überwiegte. Beispielsweise nahm das Schwall-Sunk Verhältnis an der Rhône bei Porte du Scex geringfügig ab, währenddem die Pegelanstiegsraten leicht angestiegen sind. Bei den Rückgangsraten und der Anzahl Schwallspitzen pro Tag hat sich nichts verändert. Da einerseits gar keine Änderungen vorliegen und andererseits zwei wichtige Merkmale in entgegengesetzte Richtung tendieren, wurde diese Station der Kategorie «keine Veränderung» zugeordnet. Analog war das Vorgehen bei der Klassierung in die Kategorien «geringfügiger Rückgang» oder «deutlicher Rückgang». Das Ergebnis dieser Gesamtbeurteilung zeigt Tabelle 6. Die kartografische Umsetzung der Gesamtklassierung ist in Abb. 19 dargestellt.

Tab. 6 > Gesamtbeurteilung der einzelnen Abflussmessstationen hinsichtlich der Entwicklung der Schwall-Sunk Phänomene in den letzten 20–30 Jahren.

Stationsname	Gesamtbeurteilung	
Doubs-Combe des S.		deutlicher Rückgang (1 Station)
Muota-Ingenbohl		geringfügiger Rückgang (1 Station)
Drance-Martigny		keine Veränderung (8 Stationen)
Moesa-Lumino		
Rhône-Branson		
Rhone (Rotten)-Brig		
Rhône-Porte du Scex		
Sitter-St. Gallen		
Ticino-Bellinzona		
Vispa-Visp		
Aare-Brienzwiler		geringfügige Verstärkung (6 Stationen)
Engelberger-Aa-Buochs		
Landquart-Felsenbach		
Linth-Mollis		
Reuss-Seedorf		
Rhein-Diepoldsau		
Albula-Tiefencastel		deutliche Verstärkung (7 Stationen)
Inn-Martinsbruck		
Rhein-Domat/Ems		
Saane-Laupen		
Saane-Freiburg		
Ticino-Pollegio		
Vorderrhein-Ilanz		

Abb. 19 > Gesamtbeurteilung (die Entwicklung aller Einzelmerkmale berücksichtigend) der Veränderungen von Schwall-Sunk Phänomenen in den letzten 20–30 Jahren, klassiert nach fünf Kategorien.



7 > Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Aussagen zu festgestellten Veränderungen basieren nicht auf quantitativen Trendanalysen, sondern auf visuellen, qualitativen Einschätzungen.

Die eingangs formulierte These – pro memoria: *«die Schwall-Sunk Phänomene haben in den letzten 20–30 Jahren zugenommen»* – trifft bei etwas mehr als der Hälfte der untersuchten Gewässerstellen zu, da für einzelne oder mehrere der analysierten Schwall-Merkmale 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 Umfang der Veränderungen sehr heterogen sind. Es gibt auch Stationen, an denen eine Verminderung der Merkmalswerte festgestellt wurde.

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

- > Es wird nochmals in Erinnerung gerufen, dass es sich bei der vorliegenden Studie um eine «Punktanalyse» handelt, d.h. es werden die Verhältnisse am Ort der untersuchten Messstationen klassiert. Damit wird keine Aussage über die Länge der jeweils betroffenen Gewässerstrecke gemacht. Einzelne der untersuchten Abflussmessstationen sind für eine längere Gewässerstrecke repräsentativ (beispielsweise jene an den grossen Alpenflüssen), andere sind nur für relativ kurze Gewässerabschnitte aussagekräftig. Demzufolge haben die einzelnen Punkte in den kartografischen Darstellungen 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, bei manchen Merkmalen deutlicher zu Tage tretend als bei anderen. Festgestellte und beurteilte Veränderungen betreffen nicht nur die Mittelwerte, sondern auch die Entwicklung der Variabilität (Zu- wie Abnahme) der untersuchten Schwallmerkmale. Bei der Einschätzung der Trends wird nicht das absolute Niveau des jeweiligen Merkmals (wie zum Beispiel die Höhe der Schwallabflussspitzen) in den Vordergrund gestellt, sondern vielmehr der relative Verlauf.
- > Nochmals wird festgehalten, dass mit der vorliegenden Klassierung zur Veränderung der Schwall-Sunk Phänomene noch keine Bewertung hinsichtlich einer ökologischen Verschlechterung vorgenommen wurde. Obwohl bewusst ökologisch relevante Merkmale festgelegt und berücksichtigt wurden und die Ergebnisse damit ein gutes Potential haben, ökologisch verwertet zu werden, müsste ein solcher Folgeschritt auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse aufbauend erst durchgeführt werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass es sich bei den ökologischen Auswirkungen

von Schwall-Sunk nicht um ein «lineares Problem» handelt (eine Änderung eines Schwallmerkmals um 10 Prozent führt nicht zu einer zehnpromzentigen Veränderung der ökologischen Wertigkeit), sondern dass es sich hierbei eher um Schwellenwertprobleme handelt (kritische Abflussmenge zu Geschiebetrieb, Katastrophendrift, kritische Pegelratenänderungen hinsichtlich Stranden von Jungfischen in den Flachuferbereichen etc.).

- > Aufgrund der grossen Informationsmenge und Vielzahl an untersuchten Parametern wurde eine geeignete Synthese als nötig erachtet, um gemäss dem Konzept der Informationspyramide stufengerecht je nach Adressat von Detailinformation bis zu komprimierter Information für den «Nicht-Experten» und Entscheidungsträger die Ergebnisse kommunizieren zu können. Diese Aggregation bringt zwangsweise einen Informationsverlust mit sich. Auch wurde die Aggregation nicht formal-quantitativ sondern visuell-subjektiv durchgeführt. Die damit vermittelte qualitative Aussage wird aber als «gehaltvoll» eingeschätzt und vermindert nicht die Aussagekraft zur Beantwortung der Ausgangshypothese.
- > Obwohl mit der Stationsauswahl ein grosser Teil der schwallbeeinflussten Strecken in der Schweiz analysiert wurde, stellt die Studie keine vollständige Untersuchung aller schwallbeeinflussten Strecken (und Abflussmessstationen) in der Schweiz dar.
- > Neue Speicher und Schwall-auslösende Kraftwerke wurden seit Ende der 1970er-Jahre keine errichtet. Dem entsprechend sind seit dieser Zeit auch keine neuen Gewässerstrecken von Schwall-Sunk Phänomenen betroffen. Im Rahmen der hier präsentierten Studie wurde untersucht, ob sich an den bestehenden Strecken Art und Umfang der Schwallphänomene verändert haben.
- > Die Veränderung der Schwall-Sunk Phänomene wurde mittels einer rein explorativen Datenanalyse klassiert. Ursachenforschung wurde keine betrieben. Es wurde nicht eruiert, wodurch eine festgestellte Änderung ausgelöst wurde (mögliche Gründe wurden in der Einleitung angeführt, für einige Stationen gibt VAW und LCH, 2006 Hinweise). Dass dies bei der Interpretation in manchen Fällen dennoch nötig wäre, zeigt sich beispielsweise beim Fall der Rhône bei Branson: Die Abflussmessstation liegt im unmittelbaren Einflussbereich des Kraftwerks Nendaz. Dieses wurde durch die Explosion der Druckleitung im Dezember 2000 ausser Betrieb gesetzt und wird voraussichtlich erst in den kommenden Jahren wieder in Betrieb gehen. In den Daten ist dieser Betriebsstillstand deutlich zu sehen: in den Jahren 1999 und 2000 zeichnete sich bei mehreren der untersuchten Merkmale eine Zunahme ab. Nach dem Jahr 2000 setzte sich die Zunahme infolge der Betriebsstilllegung nicht fort. Es begann sich also eine Veränderung abzuzeichnen, die dann aber durch den Unfall gestoppt wurde, so dass diese Station gesamthaft als unverändert eingestuft wurde.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich hat in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire de Construction 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 vorliegenden Studie des BAFU liegen bei der Auswahl der untersuchten Messstationen, bei der Parameterwahl sowie bei den verwendeten Grundlagendaten (weniger Stationen und untersuchte Merkmale, geringere zeitliche Auflösung der Daten). Über die Trendaussagen hinaus wurden von der VAW und LCH Untersuchungen zu Mög-

lichkeiten zur Reduktion von Schwall und Sunk durchgeführt. Vorgeschlagen werden Rückhaltevolumen unterschiedlichen Fassungsvermögens, damit im Fliessgewässer ein vorbestimmtes (kritisches) Schwall-Sunk Verhältnis eingehalten werden kann. 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.

> Literatur

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

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

Limnex 2004: Auswirkungen des Schwallbetriebes auf das Ökosystem der Fließgewässer: Grundlagen zur Beurteilung. Bericht z.Hd. WWF Schweiz.

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: Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhône-Thur-Projektes.

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

Schweizerische Fischereiberatung (FIBER) 2005: «Schwall/Sunk» – Auswirkungen des Schwallbetriebes von Wasserkraftwerken auf Fließgewässer.

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

Weber M. 2005: Schwall / Sunk Problematik. Pro Natura St. Gallen-Appenzell (Hrsg.).