

Schwall/Sunk-Betrieb in schweizerischen Fliessgewässern

- **Grundlagenstudie zu den Teilaspekten**
- **Charakterisierung von Art und Ausmass
des Schwallbetriebes**
- **Beschreibung von Massnahmen zur
Verminderung der Schwallauswirkungen**



zuhanden
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
Abteilung Gewässerschutz
3003 Bern

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	2
Bref résumé	3
Riassunto	4
1. Ausgangslage und Auftrag.....	5
2. Grundlagen und Vorgehensweise	6
3. Zu den Nutzungsverhältnissen in der Schweiz	7
4. Die schwalldämpfenden Massnahmen	12
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	24
6. Literaturverzeichnis	27
7. Anhang.....	28

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Grundlagenstudie behandelt hydrologische und technische Aspekte des Schwall/Sunk-Betriebes (kurz Schwallbetrieb) in schweizerischen Wasserkraftwerken. Sie ist vom BUWAL in Auftrag gegeben worden, um die Bedeutung des Schwallbetriebes aufzuzeigen und die bereits realisierten Massnahmen zur Verminderung der Schwallauswirkungen (schwallydämpfende Massnahmen) in der Schweiz zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden bestehende hydrologische Daten ausgewertet sowie zusätzliche Angaben zu schwallyerzeugenden Kraftwerks-Zentralen und schwallydämpfenden Massnahmen von den kantonalen Fachstellen für die Wasserkraft-Nutzung eingeholt.

Von den in der Schweiz bestehenden rund 500 Zentralen mit installierter Leistung >300kW erzeugen schätzungsweise 25% schwallyartige Abflussschwankungen in den unterliegenden Gewässern. Dabei handelt es sich vorwiegend um Speicherkraftwerke. In derselben Grössenordnung, bei ca. 30%, liegt auch der Anteil von eindeutig schwallybeeinflussten Gewässerstrecken am Total der hydrologisch überwachten Strecken. Dies hat die Auswertung der Abflussdaten von 125 über Internet abrufbaren Fliessgewässers-Messstellen für zwei Wochen des Winters 2000/2001 ergeben. Die meisten schwallybeeinflussten Stellen liegen erwartungsgemäss an den grossen Haupt-Talflüssen oder an deren grösseren, direkten Zuflüssen.

Von insgesamt 10 bekannten Zentralen, bei denen schwallydämpfende Massnahmen in Betrieb oder geplant sind, konnten deren 7 näher untersucht werden. Dabei sind, mit Ausnahme der separaten Ableitung bzw. „Umleitung“ des Schwalls in einen See oder in ein grösseres Fliessgewässer, im Wesentlichen alle denkbaren Massnahmen erfasst worden – sei es einzeln oder miteinander kombiniert. Die in der Schweiz am häufigsten realisierte Massnahme ist eine Erhöhung der minimalen Wasserrückgabe ab Zentrale (Niedrigwasser) zwecks Verminderung der Schwankungsbreite zwischen Schwall- und Sunkabfluss. Daneben sind bislang vor allem Massnahmen zur Reduktion der Änderungsgeschwindigkeit des Schwall/Sunk-Überganges ergriffen worden (z.B. langsames Anfahren/Zurückfahren der Turbinen).

Die untersuchten Indikatoren für Art und Ausmass des Schwallbetriebes (Schwall-Kennwerte) konnten durch Massnahmen in einigen Fällen deutlich bis stark verbessert werden. Dies betrifft insbesondere das maximale Verhältnis zwischen Schwall- und Sunkabfluss sowie die maximale Geschwindigkeit (Rate) des Schwall-Rückganges. Dennoch verbleiben die Schwall-Kennwerte auch *mit* Massnahmen durchwegs in einem gewässerökologisch relevanten Bereich.

Die vorliegende Grundlagenstudie führt zum Schluss, dass ein Bedarf besteht an Untersuchungen zu den gewässerökologischen Auswirkungen des Schwallbetriebes im Allgemeinen und der realisierten schwallydämpfenden Massnahmen im Besonderen. Empfohlen werden in erster Linie die Durchführung von Erfolgskontrollen an Schwallstrecken mit bestehenden Massnahmen sowie eine inhaltliche Synthese der vorliegenden Schwall-Untersuchungen aus dem Alpenraum im Rahmen einer weiterführenden Literaturstudie.

Bref résumé

La présente étude de base traite des aspects hydrologiques et techniques de l'exploitation par éclusées dans les centrales hydrauliques suisses. Elle a été réalisée à la demande de l'OFEFP dans le but de montrer l'importance de l'exploitation par éclusées et d'enquêter sur les mesures déjà réalisées en Suisse afin de diminuer les effets des variations brusques de débit (mesures d'atténuation). A cette fin, on a exploité les données hydrologiques disponibles et on est allé chercher auprès des services cantonaux des informations supplémentaires concernant les centrales hydrauliques qui provoquent des variations brusques de débit ainsi que les mesures destinées à atténuer ces effets.

Parmi les quelque 500 centrales suisses dont la puissance installée dépasse 300 kW, environ 25% provoquent de brusques variations de débit dans les cours d'eau en aval. Il s'agit avant tout de centrales à accumulation. Sur l'ensemble des tronçons soumis à une surveillance hydrologique, la proportion de tronçons indéniablement influencés par les éclusées est d'environ 30%. Ces résultats proviennent de l'exploitation de données concernant deux semaines de l'hiver 2000/2001, tirées de 125 stations de mesures de cours d'eau consultables sur l'Internet. Il s'agit en majorité de cours d'eau d'une certaine taille, qui sont, comme on pouvait s'y attendre, soumis à de plus grandes variations de débit dues à l'exploitation par éclusées que les petits cours d'eau.

Sur dix centrales connues dans lesquelles des mesures d'atténuation ont été prises ou sont planifiées, sept ont pu faire l'objet d'une investigation plus poussée. À l'exception du déversement ou détournement des débits de pointe dans un lac ou dans un cours d'eau plus important, toutes les solutions envisageables ont été prises en compte. Certaines fois, une seule mesure est prise, d'autres fois, plusieurs mesures sont combinées. La mesure la plus souvent réalisée en Suisse consiste à augmenter le débit d'eau minimal sortant de la centrale (étiage), afin de réduire la différence entre le débit minimal et le débit maximal. À part cela, on a surtout pris jusqu'ici des mesures destinées à ralentir les variations de débit (p. ex. mise en marche et arrêt progressifs des turbines).

Dans certains cas, grâce aux mesures prises, les valeurs des indicateurs définissant le type et l'ampleur des éclusées ont pu être nettement améliorées. Cela concerne en particulier le rapport le plus élevé entre débit maximal et débit minimal ainsi que la vitesse la plus élevée (taux) de la décrue. Toutefois, même *avec* des mesures, les paramètres caractéristiques des variations de débit restent de nature à influencer l'écologie des eaux.

La présente étude de base arrive à la conclusion qu'il est nécessaire d'étudier les effets de l'exploitation par éclusées sur l'écologie des cours d'eau, et en particulier les mesures réalisées pour atténuer les variations brusques de débit. Il est avant tout recommandé de procéder à un suivi sur les tronçons pour lesquels des mesures d'atténuation ont été prises et de faire la synthèse des enquêtes disponibles pour l'arc alpin, dans le cadre d'une étude plus approfondie de la documentation existante.

Riassunto

La presente ricerca tratta gli aspetti idrologici e tecnici delle onde di piena artificiali (o variazioni della portata) provocate dalle centrali idroelettriche svizzere. Essa è stata eseguita su mandato dell'UFAFP per evidenziare l'importanza delle variazioni della portata e per esaminare le misure di riduzione degli effetti dell'onda di piena artificiale (misure di riduzione per le oscillazioni) adottate in Svizzera. A tale scopo sono stati valutati i dati idrologici disponibili e sono state raccolte presso gli uffici cantonali competenti delle indicazioni supplementari sia sugli impianti idroelettrici il cui esercizio causa onde di piena sia sulle misure di attenuazione delle oscillazioni.

Dei circa 500 impianti idroelettrici con una potenza installata di >300 kW ubicati in Svizzera, più o meno il 25 per cento genera, nei corsi d'acqua a valle, delle fluttuazioni del deflusso dovute alle proprie modalità d'esercizio. Si tratta per lo più di centrali idroelettriche ad accumulazione. Con lo stesso ordine di grandezza, ossia all'incirca il 30 per cento, dei corsi d'acqua monitorati dal profilo idrologico, essi risultano inequivocabilmente influenzati dal fenomeno di piena artificiale. Queste conclusioni sono emerse dall'elaborazione dei dati di 125 stazioni idrometriche, raccolti per due settimane durante l'inverno 2000/2001 e consultabili su Internet. Sono stati analizzati soprattutto corsi d'acqua più importanti, che, conformemente alle aspettative, sono notevolmente influenzati dal fenomeno di piena artificiale.

È stato possibile esaminare più accuratamente sette delle dieci centrali che hanno già adottato o che prevedono di adottare misure di attenuazione delle oscillazioni. Sostanzialmente, nell'ambito delle analisi eseguite, sono state vagliate tutte le misure attualmente immaginabili (siano esse applicate singolarmente che in combinazione l'una con l'altra), eccezion fatta per gli impianti con una restituzione delle acque separata, quindi non direttamente nel ricettore, e per quelli in cui la restituzione avviene in un lago o in un corso d'acqua molto più grande. La misura adottata con maggiore frequenza in Svizzera è l'aumento della restituzione minima di acqua, a valle della centrale (deflusso minimo), nell'intento di ridurre la differenza dei parametri idraulici del deflusso fra i due estremi dell'oscillazione. Inoltre, sono stati sinora adottati soprattutto provvedimenti per ridurre la velocità di variazione del passaggio dal massimo al minimo dei parametri idraulici del deflusso fra i due estremi dell'oscillazione (p. es. aumento o riduzione lento del carico delle turbine).

In alcuni casi, le misure adottate hanno permesso di migliorare, secondo una scala di valutazione che va da evidente a notevole, gli indicatori analizzati relativi al tipo e all'entità della variazione della portata (parametri specifici del fenomeno di onda di piena artificiale). Ciò concerne in particolare il rapporto massimo fatto registrare dalla differenza dei parametri idraulici della portata nonché la velocità massima (tasso) con cui le oscillazioni si stabilizzano. Ciononostante, i parametri specifici dell'onda di piena artificiale rimangono considerevoli dal profilo dell'ecologia delle acque anche dopo l'adozione di misure di attenuazione.

La presente ricerca trae la conclusione che è tuttora necessario esaminare, in generale, le ripercussioni causate dalla variazione della portata sull'ecologia delle acque e, in particolare, i provvedimenti di attenuazione delle oscillazioni applicate fino a oggi. Si raccomanda in primo luogo l'esecuzione di un controllo dei risultati degli effetti delle misure mitigatrici già adottate nei tratti di corsi d'acqua influenzati dal fenomeno della piena artificiale, nonché la stesura, in un saggio più ampio, di una sintesi dei contenuti della presente ricerca sulle onde di piena artificiali nell'arco alpino.

1. Ausgangslage und Auftrag

Künstlich erzeugte, tagesrhythmische Abflussschwankungen treten in mittleren bis grösseren Fliessgewässern unterhalb von Kraftwerkszentralen auf, welche gespeichertes Wasser zur Deckung des Spitzenbedarfes intermittierend abarbeiten. Die möglichen Auswirkungen dieses Schwall/Sunk-Betriebes¹ auf die Hydrologie und die Ökologie der betroffenen Gewässer sind grundsätzlich bekannt und z.B. in Schöb (1998) und Forstenlechner et al. (1997)² zusammenfassend beschrieben. Über derartige allgemeine Erkenntnisse hinaus bestehen für die *spezifischen Verhältnisse des Alpenraums* aber noch keine aktuellen, übersichtlichen Darstellungen, die bei der *konkreten* Untersuchung und Beurteilung von schwallbeeinflussten Gewässern herangezogen werden könnten. In den wenigen Ansätzen zu einer Review der Schwallproblematik werden als alpine Beispiele denn auch häufig dieselben paar Fallstudien zitiert (z.B. Bregenzer Ache, Drau). Eine ganze Reihe jüngerer, in der Schweiz und ihren Nachbarländern durchgeführter Arbeiten an ganz unterschiedlichen Schwallstrecken ist unseres Wissens bisher nicht zusammenfassend ausgewertet worden. Die Resultate dieser Untersuchungen sind z.T. nur in Fachberichten beauftragter Hochschul-Institute oder privater Firmen dokumentiert und entsprechend eingeschränkt zugänglich (graue Literatur).

In den vergangenen Jahren ist der gewässerökologischen Problematik des Schwallbetriebes sowohl von Seiten der limnologischen Forschung als auch von den mit der Umsetzung des Gewässerschutzes betrauten Vollzugsbehörden zunehmende Aufmerksamkeit geschenkt worden. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang etwa

- die notwendige Behandlung und Beurteilung des Schwallbetriebes bei Umweltverträglichkeitsberichten (UVB) und -prüfungen (UVP) von Wasserkraftwerken;
- der Einfluss des Schwallbetriebes auf den gesetzlich vorgeschriebenen Schutz und die Nutzung von Fliessgewässern (fischereiliche Bestandessicherung und Bewirtschaftung, Verdünnungsverhältnisse bei Abwassereinleitungen etc.);
- die speziellen Voraussetzungen und Randbedingungen in Schwallstrecken im Hinblick auf geplante Aufwertungen (Revitalisierung/Renaturierung) von Fliessgewässern;
- die Berücksichtigung des Themenbereichs Schwall/Sunk bei der Festlegung bzw. Überprüfung der gewässerökologischen Kriterien für eine nachhaltig erzeugte, als umweltgerecht zertifizierte Energie („Ökostrom“).

Das Bedürfnis für eine Bestandesaufnahme und zusammenfassende Darstellung der vorhandenen Grundlagen zur Ausprägung und zu den ökologischen Auswirkungen des Schwallbetriebes ist demnach ausgewiesen. In einem ersten Schritt hat das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) die Firma Limnex AG am 15.9.2000 mit einer Studie zu folgenden Teilaspekten des Schwallbetriebes in schweizerischen Gewässern beauftragt:

- Charakterisierung von Art und Ausmass des Schwallbetriebes;
- Beschreibung von Massnahmen zur Verminderung der Schwallauswirkungen.

Der vorliegende Bericht enthält die Resultate dieser Studie (Kapitel 3 und 4) sowie Vorschläge für eine mögliche weitergehende Bearbeitung und Vertiefung des Themas (Kapitel 5).

¹ In der Folge kurz Schwallbetrieb genannt.

² Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Berichtes.

2. Grundlagen und Vorgehensweise

Der vorliegende Teil einer Bestandaufnahme zum Schwallbetrieb umfasst ausschliesslich die hydrologischen und technischen Aspekte von schweizerischen Kraftwerksanlagen, bei denen bauliche und/oder betriebliche Massnahmen zur Verminderung der schwallbedingten Auswirkungen auf die unterliegenden Gewässer realisiert worden sind. Erfasst wurde ausserdem hauptsächlich die Charakteristik des Schwallbetriebes beim Kraftwerks-Auslauf (z.B. im Unterwasserkanal). Die Verhältnisse in den unterliegenden Gewässern wurden soweit mit einbezogen, als es anhand von bestehenden Abflussmessstationen möglich war.

Für eine erste Übersicht über die schweizerischen Schwallstrecken wurden allgemein zugängliche Unterlagen und Angaben aus folgenden Quellen gesammelt und aufgearbeitet:

- Statistiken zur Wasserkraftnutzung in der Schweiz;
- Hydrologische Inventare und Messdaten;
- Angaben des BUWAL und des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG).

Auf dieser Grundlage konnte eine vorläufige Liste von insgesamt 73 Kraftwerks-Zentralen mit mutmasslichem Schwallbetrieb (Rückgabe-Zentralen) erstellt werden. Anschliessend gelangte das BUWAL mit einer gezielten Umfrage an die für die Wasserkraft-Nutzung zuständigen Fachstellen aller Kantone sowie des Fürstentums Liechtenstein. Der verschickte Fragebogen ist in Anhang 2 des vorliegenden Berichtes wiedergegeben. Es wurde darin im Einzelnen gefragt nach

- den im täglichen Betrieb *effektiv* schwallerzeugenden unter den Kraftwerks-Zentralen in der (mitgelieferten) vorläufigen Liste;
- allfälligen zusätzlichen, noch nicht aufgeführten Zentralen mit Schwallbetrieb;
- in eigener Regie betriebenen Abfluss-Messstationen (hydrometrische Stationen);
- bereits realisierten oder geplanten schwalldämpfenden Massnahmen mit Angaben zu deren Art, zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme sowie zu Kontaktpersonen für weitere Auskünfte.

Bei den von den Kantonen gemeldeten oder aus den anderen Quellen bekannten Zentralen mit schwalldämpfenden Massnahmen wurden schliesslich über die jeweiligen Kontaktpersonen die benötigten hydrologischen und technischen Angaben und Daten für die Darstellung der hier behandelten Teilaspekte eingeholt. Diesen Personen, die teils kantonale Amtsstellen, grösstenteils aber die betroffenen Kraftwerks-Gesellschaften vertreten, gilt an dieser Stelle unser Dank für die durchwegs entgegenkommende Beantwortung der Detail-Fragen und die freigebige Lieferung der gewünschten Daten.

Die Auswertungen umfassten die folgenden Schritte und Aspekte:

1. Beschreibung der Nutzungssituationen anhand von Art und Ausmass des Schwallbetriebes beim Kraftwerks-Auslauf (Höhe und zeitliche Verteilung der Schwall- bzw. Sunkabflüsse, Verlauf von Schwallbeginn und -ende) sowie anhand einer groben Charakterisierung der betroffenen Gewässer.
2. Beschreibung von baulichen und/oder betrieblichen Massnahmen zur Verminderung der Schwallauswirkungen sowie von deren Effekt auf die vom Kraftwerk abgegebene Abflussmenge und -variation (Wasserführung mit bzw. ohne Massnahme).

3. Zu den Nutzungsverhältnissen in der Schweiz

Die Angaben zur Wasserkraftnutzung aus BWW (1968, 1973, 1991) und BWG (1992-2001) ergaben eine vorläufige Liste von 73 Rückgabe-Zentralen (Kapitel 2). Mit Hilfe der zusätzlichen Angaben aus der Umfrage bei den Kantonen sowie aus weiteren Quellen konnte diese Liste ergänzt und bereinigt werden (Tabelle 1). Sie umfasst nun 92 Kraftwerks-Zentralen, die durch ihren intermittierenden Betrieb schwallartige Abflussschwankungen im unterliegenden Gewässer erzeugen oder dazu beitragen. Dabei handelt es sich „naturgemäss“ fast ausschliesslich um Speicherkraftwerke.³ In Anhang 1 ist die geografische Lage der schwallerzeugenden Zentralen auf einer Übersichtskarte dargestellt.

Die Umfrage ist von 25 der angeschriebenen 27 Wassernutzungs-Fachstellen beantwortet worden. Es ist deshalb anzunehmen, dass in Tabelle 1 ein grosser Teil der bestehenden Zentralen mit Schwallbetrieb aufgeführt ist. Die Zusammenstellung ist aber noch keineswegs vollständig, wie einige nachträglich „aufgetauchte“ Anlagen gezeigt haben. Die bisher noch nicht berücksichtigten Fälle mit einbezogen, wird für die Schweiz daher mit rund 120 schwallerzeugenden Kraftwerkszentralen gerechnet. Dies entspricht einem Anteil von ca. 25% an den in BWW (1991) aufgeführten total 490 Zentralen.

Um die „quantitative“ Bedeutung der Schwallproblematik für die schweizerischen Fliessgewässer noch besser zu erfassen, wurden die über Internet abrufbaren Pegel- und Abflussganglinien der eidgenössischen hydrometrischen Stationen (LHG 2000/2001) für zwei ausgewählte Wochen systematisch durchgesehen und alle Stationen mit deutlich erkennbarem Einfluss von Schwallbetrieb aus oberliegenden Kraftwerkszentralen hinsichtlich ihrer Abflusscharakteristik weiter ausgewertet. Die beiden Wochen (jeweils von Donnerstag bis Mittwoch) wurden bewusst auf den Winter gelegt, weil dann in den vielen schwallbeeinflussten alpinen Gewässern natürlicherweise Niedrigwasserverhältnisse (und damit auch minimale Sunkabflüsse) herrschen. In bezug auf die Witterung unterschieden sich die beiden Perioden stark:

- In der Woche vom 7.12. bis 13.12.2000 war es im ganzen Land für die Jahreszeit deutlich zu warm, in der Westschweiz über das – normalerweise „schwallfreie“ – Wochenende ausserdem regnerisch.⁴
- Die Woche vom 22.2. bis 28.2.2001 zählte zu den kältesten des Winters und brachte am Wochenende etwas Niederschlag (in Form von Schnee bis in die Niederungen).

Die Auswertung dieser beiden Wochen ergab, dass die Wasserführung an 35 Stationen mehr oder weniger stark durch Schwallbetrieb beeinflusst war (Tabelle 2). Dies entspricht einem Anteil von fast 30% der insgesamt 125 berücksichtigten Fliessgewässer-Messstellen.⁵

³ Ausnahmen stellen gewisse Kraftwerksketten dar, innerhalb derer die Schwälle von einer Stufe zur nächsten weitergegeben werden, ohne das Wasser in eine dazwischenliegende Fliessstrecke zu entlassen (Rückgabe direkt in den Staubereich der anschliessenden Fassung). In diesen Einzelfällen enthält die Liste nicht nur die schwallerzeugende Zentrale des oberliegenden Speicherkraftwerkes, sondern auch diejenige des unterliegenden Laufkraftwerkes, das im Rückgabegewässer schliesslich den Schwall hervorruft. Beispiele dafür sind die Kraftwerksketten Seujet -> Verbois an der Rhône oder Montcherand -> Le Chalet an der Orbe (Tabelle 1). Eine weitere Ausnahme stellen einige Laufkraftwerke am Unterlauf der Aare dar, aus deren grossen Stauhaltungen bereits bei geringfügiger Veränderung des Wasserspiegels (um wenige cm) beträchtliche Abflussschwankungen im unterliegenden Gewässer entstehen können. Diese schwallartigen, oft kurzfristigen Variationen, die z.B. bei den Aare-Messstellen Brugg und Untersiggenthal festgestellt worden sind (Tabelle 2), konnten nicht eindeutig bestimmten Kraftwerken zugeordnet werden.

⁴ Die durch Niederschlag bedingten Abflussspitzen waren von den kraftwerksbedingten Schwällen klar zu unterscheiden und wurden bei den Auswertungen nicht weiter berücksichtigt.

⁵ Die Messstationen waren zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht so vollständig abrufbar, wie dies heute der Fall ist. Deshalb fehlen in Tabelle 2 auch etliche eindeutig schwallbeeinflusste Stellen (z.B. am Poschiavino oder am Oberlauf der Linth).

Erwartungsgemäss liegen die meisten schwallbeeinflussten Stellen an den grossen Haupt-Talflüssen oder an deren grösseren, direkten Zuflüssen. Dies kommt auch in den langjährigen mittleren Jahresabflüssen (Q_m) zum Ausdruck, die nur in wenigen Fällen unter $10 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen. Anhaltspunkte dafür, in welchem Ausmass die verschiedenen Grössenklassen von alpinen Fliessgewässern hydroelektrisch genutzt werden, haben etwa detaillierte Untersuchungen im oberen Puschlav ergeben (UVB KWB, 1992):

- Die nach dem System von Strahler (1957) klassierten Bäche 1. bis 3. Ordnung werden nicht genutzt;
- Von den Bachstrecken 4. Ordnung werden 49% durch Wasserentnahmen genutzt (Restwasserstrecken);
- Die Strecken 5. Ordnung sind zu 100% durch Wasserentnahmen genutzt;
- Die einzige Strecke 6. Ordnung (kleinerer Haupt-Talfluss, $Q_m = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$) ist zu 100% durch eine Wasserrückgabe genutzt (Schwallstrecke).

Da die Seen im Vorland der Alpen und des Juras die zufließenden, oft sehr ausgeprägten Schwälle vollständig ausgleichen, sind die daraus abfließenden grossen Mittelland-Flüsse über weite Strecken frei von kurzfristigen, kraftwerksbedingten Abflussschwankungen. Letztere machen sich erst dort wieder bemerkbar, wo grössere schwallbeeinflusste Seitenflüsse einmünden (z.B. in der Aare bei Hagneck unter dem Einfluss der Saane). Die speziellen, aus Laufkraftwerken stammenden Schwälle im Unterlauf der Aare (nach dem Bielersee) und der Rhône (nach dem Lac Léman) sind bereits erwähnt worden.

Die in den beiden „Testwochen“ erfassten maximalen Differenzen zwischen Schwall- und Sunkabfluss ($\Delta_{\max}Q$) liegen oft in derselben Grössenordnung wie die mittlere Wasserführung des Gewässers über das ganze Jahr ($0.5 \cdot Q_m$ bis $2 \cdot Q_m$). Gemessen an dem im Mittel während 274 Tagen im Jahr erreichten oder überschrittenen Abfluss (Q_{274} , als grobes Mass für ein ca. drei Monate andauerndes winterliches Niedrigwasser) erreicht $\Delta_{\max}Q$ meist ein Mehrfaches (bis zu Faktor 6). Im Vergleich zu einem *natürlichen*, d.h. durch den werktäglichen Schwallbetrieb *nicht* schon heraufgesetzten Winterabfluss wären die Schwälle noch stärker überhöht.

Die maximalen Differenzen des Wasserspiegels zwischen Schwall und Sunk ($\Delta_{\max}P$) variieren innerhalb der erfassten Fliessgewässer zwischen 0.1 und 2.5 m. Dabei nehmen die Pegelschwankungen mit steigender Gewässergrösse und damit steigendem Q_m in der Regel etwa gleichermassen zu wie die Abflussschwankungen; bei Veränderungen des Wasserspiegels ist jedoch zu berücksichtigen, dass ihr Ausmass – im Gegensatz zu den Abflusswerten – stark von der Geometrie des Gewässers abhängt und damit in den teilweise technisch gestalteten Mess-Querschnitten nicht repräsentativ für den ganzen Flussabschnitt sein muss. Dies gilt natürlich nicht nur für die Veränderungen in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung (für die hier nicht erfasste benetzte Breite). Trotz dieser Einschränkungen machen die Daten in Tabelle 2 deutlich, dass die schwallbedingten Pegelschwankungen in den meisten der aufgeführten Fälle gewässerökologisch hoch relevant sein dürften.

Tabelle 1

Bereinigte Liste der Schwallstrecken bzw. -zentralen in der Schweiz aufgrund aller berücksichtigter Quellen. Nicht aufgeführt sind Kraftwerksstufen, deren abturbiniertes Wasser direkt in einen unterliegenden See eingeleitet oder bis zur Weitergabe an die folgende Stufe in einem Ausgleichsbecken zwischengelagert wird. Ebenfalls nicht aufgeführt sind schliesslich reine Laufkraftwerke, die zufließende Schwälle mehr oder weniger unverändert weitergeben (Ausnahmen: Zentralen Seujet -> Verbois und Montcherand -> Le Chalet; siehe Text). Die Pfeile (->) bei den Rückgabe-Gewässern bedeuten, dass das entsprechende Gewässer nach kurzer Fliessstrecke in ein nächstgrösseres einmündet. Die Abkürzungen der Kraftwerks-Gesellschaften stammen aus BWW (1991). Kt. = Kanton; BK = Binnenkanal; SM = schwalldämpfende Massnahmen (in Klammern: im vorliegenden Bericht nicht weiter berücksichtigt, da noch nicht in Kraft gesetzt oder keine geeigneten Daten verfügbar). US = Gewässerökologische Begleituntersuchungen zum Schwallbetrieb vorhanden. ¹⁾: Studie über ganzen Alpenrhein von Reichenau bis Bodensee. ²⁾: Studie über ganze Rhône von Susten bis Lac Léman.

Kt./Land	Rückgabe-Gewässer	Rückgabe-Zentrale	Gesellschaft	Speicher	SM	US
BE (BE / VS)	Aare	Innertkirchen	KWO	Oberaar-, Trübten-, Gelmer-, Grimsel-, Räterichsboden-, Engstlen-, Totensee; Staubecken Mattenalp		
BE	Alpbach -> Aare	Meiringen I	EWM	Haselholz		
BE	Aare	Reichenbach I	EWR	Zwirgi		
BE	Mühlebach -> Schwarze Lutschine	Isch	EWG	Bachsee		
BE	Wildenbach -> Simme	Klusi	SKW	Oberstockensee	(X)	
BE / VS	Saane	Innergsteig	KWS	Speicher Sanetsch (Senin)		
FL	Vaduzer Giessen -> Liechtenst. BK	Samina	LKW	Stausee Steg		
FR / VD	La Sarine	Lessoc	EEF	Lac de Lessoc		
FR	La Jogne -> Lac de la Gruyère	Broc	EEF	Lac de Montsalvens		
FR	La Sarine	Hauterive	EEF	Lac de la Gruyère	X	X
FR	La Sarine -> Lac de Schiffenen	Oelberg	EEF	Lac de Pérolles		
GE	Le Rhône	Seujet -> Verbois	SIG	Lac Léman	X	
GL	Linth	Linthal	KLL	Mutt-, Limmerensee	X	
GL	Sernf -> Linth	Schwanden	SN	Garichtisee		
GL	Löntschi -> Linth	Am Löntschi	NOK	Klöntaler See		
GL	Tränkbach	Näfels	EWN	Obersee		
GR	Ferrerabach -> Vorderrhein	Trun-Ferrera	EWBO	Kaverne	(X)	X
GR	Vorderrhein	Ilanz I	KWI / KVR	Lai da Curnera, Nalps, Lai da Sontga Maria		
GR	Vorderrhein	Ilanz II	KWI	Speicher Pigniu (Panix)		
GR	Hinterrhein	Rothenbrunnen (a)	KWZ	Zervreilasee		
GR / I	Albula -> Hinterrhein	Sils i.D. (a)	KHR	Lago di Lei, Sufnersee		
GR	Albula -> Hinterrhein	Sils i.D. (b)	EWZ	Lai da Marmorera		
GR	Hinterrhein	Rothenbrunnen (b)	EWZ	Lai da Marmorera		
GR	Plessur	Litzrüti	EWA	Isel		
GR	Landquart	Küblis	Rätia (BK)	Davoser See		X
GR	Moesa	Soazza	OIM	Lago d'Isola		
GR	Moesa	Lo stallo	ELIN SA	Darbola		
GR	Poschiavino	Robbia	Rätia (FMB)	Lago Bianco	X	X
GR	Poschiavino -> Adda (I)	Campocologno I+II	Rätia (FMB)	Lago di Poschiavo		
GR	Maira	Castasegna	EWZ	Lago da l'Albigna		
GR	Inn	Islas	EW St. Moritz	Lej da San Murezzan, Champfèr, Silvaplana, Segl	(X)	X
GR	Inn	Martina	EKW	Lago di Livigno		
JU/NE/F	Le Doubs	Le Refrain	EDF	Biaufond		
JU	Le Doubs	La Goule	SEG	La Goule		
LU	Dorbach Büron	Keine Angabe	Arnold & Cie.	Kleinstspeicher (Weiher)		
NE / F	Le Doubs	Le Châtelot	SFMC	Lac de Moron	X	X
NW	Secklisbach -> Engelberger Aa	Oberrickenbach	EWN	Bannalpsee		X
OW / NW	Engelberger Aa	Wolfenschiessen	KWE, EWL-E	Trüebsee		
OW	Aa	Unteraa	EWO	Lungerer See		
OW	Hugschwendibach -> Melchaa	Hugschwendli	EWO	Melch-, Tannensee		
SG	Alpenrhein	Sarelli	KSL	Gigerwald, Speicher		X ¹⁾
SG / AR	Sitter	Kubel	SAK	Gübsensee	X	X
SZ	Muota	Seeberg + Balm	EBS	Glattalpsee, Diverse		
SZ	Muota	Wernisberg	EBS	Selgis		
SZ	Wägitaler Aa	Siebnen	AKW	Wägitaler See, Rempen		

Tabelle 1 (Schluss).

Kt./Land	Rückgabe-Gewässer	Rückgabe-Zentrale	Gesellschaft	Speicher	SM	US
TG	Murg	An der Murg	EW Simach	Rübiweiher		
TI	Ticino	Airolo	ATEL	Lago di Lucendro, della Sella		
TI	Ticino	Stalvedro	AET	Lago di Lucendro, della Sella		X
TI	Ticino	Ritom	SBB	Lago Ritom, Cadagno		X
TI	Lagasca -> Ticino	Rodi	AET	Lago Tremorgio		
TI	Ticino	Personico	AET	Chironico, Val d'Ambrà		
TI	Ticino	Biasca	OFIBLE	Lago di Luzzone		
TI	Morobbia -> Ticino	Morobbia (Loro)	AEMB	Carmena		
UR	Oberalpsee (See bis Schöni)	ab Oberalpsee	EWU	Oberalpsee		
UR / TI	Unteralpsee	bei Stäubenfall	SBB	(Lago Ritom)		
UR	Unteralpsee	Andermatt	EWU	See bei Schöni		
UR	Schöllenenreuss	bei Umerloch	KWG	Umerloch		
UR	Reuss	Amsteg (a)	KWG / KWW	Göscheneralpsee		
UR	Reuss	Amsteg (b)	SBB	Pfaffensprung	X	X
UR	Reuss	Amsteg (c)	EWA	Arnisee		
UR	Bockibach	Ripshusen	GWE	Waldnacht		
UR	Schächenbach -> Reuss	Bürglen	EWA	Reservoirstollen		
VD	L'Orbe	La Demier	RE	Lacs de Joux et Brenet		
VD	L'Orbe	Montcherand ->	RE	Le Day		
VD	L'Orbe	-> Le Chalet	SUO	Le Chalet	X	
VD	L'Avançon de Bex	Sublin I	FMA	La Peuffeyre		
VD / BE	Grande Eau -> Le Rhône	Diablerets	RE	Lac d'Arnon (Arnensee)		
VD	Baye de Montreux	Taulan	RE	Sonzier		
VD	L'Aubonne -> Lac Léman	Plan-Dessous	SEFA	Arboretum	(X)	
VS	Längtalwasser -> Binna	Heiligkreuz	GKW	Kummenbord		
VS	Rotten	Mörel	RHOWAG	Kummenbord / Zen Binnen		
VS	Rotten	Neubrigg	GKW	Frid		
VS	Rotten	Bisch-Biel	EM	Stausee Gibidum		
VS	Ganterbach -> Saltina	Berisal	EBG	Bortelsee		
VS	Saltina -> Rotten	Siliboden	KGWS	Bortelsee		
VS	Vispa -> Rotten	Stalden	KWM	Mattmarksee		
VS	Vispa -> Rotten	Ackersand 2	Aletsch AG	Mattsand		
VS	Lonza -> Rotten	Steg	KW Loetschen	Ferden		
VS	Turtmannä -> Rotten	Unterems	ITAG	Illsee		
VS	Le Rhône	Chippis	ALAG / FMG	Lac de Moiry, Turtmann		X ²⁾
VS	Le Rhône	St. Leonard	ELSA	Lac de Tseuzier		
VS	Le Rhône	La Chandoline	EOS	Lac de Cleuson, Lac des Dix		
VS	Le Rhône	Riddes	FMM / G.D. SA	Lac de Cleuson, Lac des Dix, Lac de Mauvoisin		
VS	La Lizerne -> Le Rhône	Ardon	LMSA	Goday		
VS	Canal d'assainissement -> Rhône	Fully	EOS	Lac de Fully		
VS	La Drance de Bagnes -> La Dranse	Orsieres	FMO / FGB	Lac des Toules, de Champex		
VS	La Dranse -> Le Rhône	Martigny-Bourg	EOS	Lac des Toules, de Champex		
VS	Le Rhône	Vernayaz	SBB / ESA	Lac du Vieux Emosson, Lac d'Emosson		
(VS / F)						
VS	La Salanfe -> Le Rhône	Mieville	SALANFE	Lac de Salanfe		
VS	Le Fossaux -> Le Rhône	Vouvry	SFMGE	Lac de Tanay		
VS	Doveria	Gondo	EES	Serra		
ZG	Lorze	Baar	SAE AG	Aegerisee		

Anmerkung: Vom Kanton Aargau wurden ausserdem die beiden schwallerzeugenden Zentralen des Kraftwerks Waldshut und des Pumpspeicher-Kraftwerks Säckingen gemeldet, welche das abgearbeitete Wasser in die Stauräume der Rheinkraftwerke Albbruck-Dogern bzw. Säckingen entlassen. An diesen beiden "Rückgabe"-Werken sind der Kanton Aargau (mit einem Anteil von 54 bzw. 50 %) und das deutsche Bundesland Baden-Württemberg beteiligt. Die eigentlich schwallerzeugenden Zentralen gehören konzessionsrechtlich jedoch vollständig zu Deutschland (Schluchseewerk AG, Freiburg i.Br.) und sind in vorstehender Tabelle aus diesem Grund nicht aufgeführt. Der Rhein wies unterhalb der beiden Rückgabe-Zentralen in den zwei untersuchten Wochen nur vergleichsweise geringe Abfluss- und Pegelschwankungen auf (LHG-Messstation Rheinfelden), welche zudem noch durch die flussaufwärts einmündende Aare beeinflusst sein können. Der Hochrhein bei Rheinfelden wurde deshalb nicht zu den deutlich schwallbeeinflussten Gewässerstrecken gezählt (Tabelle 3).

Tabelle 2

Zusammenstellung von Abfluss-Messstellen (hydrometrische Stationen der Landeshydrologie und -geologie) mit deutlich erkennbarem Einfluss von Schwallbetrieb sowie von zugehörigen Kennwerten der Wasserführung (Q) und des Pegelstandes (P). Ausgewertet worden sind die über Internet abrufbaren Ganglinien für die Wochen vom 7.12.00 bis 13.12.00 sowie vom 22.2.01 bis 28.2.01. Q_m = langjähriges Abflussmittel; Q_{274} = langjähriges Mittel des an 274 Tagen pro Jahr erreichten oder überschrittenen Abflusses (Werte aus LHG, 1999); Δ_{\max} Schwall - Sunk = Differenz zwischen Maximalschwall und Minimalsunk innerhalb der zwei ausgewerteten Wochen (ohne Berücksichtigung von Niederschlags-bedingten Abflusserhöhungen). BK = Binnenkanal.

Flusssystem Hauptfluss	Zufluss	Station	Schwall- Spitzen/Tag	Q_m / Q_{274} [m ³ /s]	Δ_{\max} Schwall - Sunk		
					Q [m ³ /s]	P [m]	
Aare / Aare		Brienzwiler	1 - 3	34.7 / 18.1	44	1.2	
	Sarine	Broc	1 - 3	23.6 / 9.4	21	0.5	
	Sarine	Fribourg	1 - mehrere	41.7 / 24.5	60	0.75	
	Saane	Laupen	1 - 2	54.0 / 31.6	170	1.45	
	Aare	Hagneck	1 - 2	180 / 105	180	2.5	
	Orbe	Le Chalet	1 - 3	12.0 / 4.4	19	0.65	
	Aare	Brugg	mehrere	315 / 219	130	1.0	
Aare	Untersiggenthal	mehrere	560 / 357	180	0.3		
Doubs / Doubs		Ocourt	1 - 2	33.2 / 10.6	60	0.4	
Inn / Inn		Martinsbruck	1 - 2	53.7 / 24.1	100	1.3	
Limmat	Linth	Mollis	1 - 2	32.0 / 17.5	40	0.9	
Reuss	Schächenbach	Bürglen	1	5.8 / 2.1	2	0.1	
	Reuss	Seedorf	1 - mehrere	44.6 / 13.7	28	0.65	
	Muota	Ingenbohl	1	19.1 / 6.0	10	0.5	
	Engelberger Aa	Buochs	1 - 2	12.2 / 5.0	8	0.25	
	Lorze	Zug	1	2.9 / 1.7	1	0.1	
Rhein	Albula	Tiefencastel	2 - 3	15.5 / 6.2	18	0.45	
	Hinterrhein	Fürstenu	1 - 2	40.5 / 17.4	90	0.85	
	Vorderrhein	Ilanz	1 - mehrere	33.0 / 15.4	55	0.8	
	Alpenrhein	Domat/Ems	1 - 2	115 / 62.5	170	1.5	
		Landquart	Felsenbach	1	24.6 / 9.1	11	0.2
		Liechtenst. BK	Ruggell	1	4.9 / 3.2	2	0.15
	Alpenrhein	Diepoldsau	1 - 2	234 / 130	200	1.1	
		Sitter	St. Gallen	1 - 2	10.4 / 3.4	21	0.5
Rhône / Rhône		Brig	1 - 2	41.9 / 9.6	40	0.45	
		Vispa	1 - 2	17.0 / 9.2	26	0.55	
	Rhône	Sion	1 - 2	112 / 39.4	65	0.75	
	Rhône	Branson	1 - 2	133 / 64.3	150	1.35	
	Rhône	Porte du Scex	1 - 3	182 / 91.7	200	1.4	
		Aubonne	Allaman	1	5.8 / 1.7	4	0.3
	Rhône	Chancy	1 - 2	342 / 207	480	2.05	
Ticino / Ticino		Piotta	1 - 2	2.4 / 1.0	1	0.1	
	Ticino	Pollegio	1 - 3	20.8 / 11.8	55	0.65	
		Moesa	Lumino	1 - 2	20.6 / 6.6	27	0.35
	Ticino	Bellinzona	1 - 2	68.6 / 31.0	100	1.0	

4. Die schwalldämpfenden Massnahmen

Aus der Umfrage bei den Nutzungs-Fachstellen und aus anderen Quellen gingen total 11 Kraftwerks-Zentralen hervor, bei denen schwalldämpfende Massnahmen realisiert oder vorgesehen sind (Tabelle 1). Vier davon konnten in der vorliegenden Studie aus verschiedenen Gründen nicht im Detail ausgewertet werden:

- Die Zentrale Klusi der SKW am Wildenbach (BE). Schwallbetrieb herrscht jeweils zwischen Anfang November und Ende Dezember bzw. Ende Januar. Die Nutzungsbewilligung von 1996 enthält einen Passus, wonach plötzliche Wasserstandsschwankungen nach Möglichkeit zu verhindern sind. Gezielte schwalldämpfende Massnahmen werden jedoch nicht praktiziert.
- Die Zentrale Trun-Ferrera der EWBO am Ferrerabach (GR). Schwallbetrieb herrscht jeweils im Winter. Ende 1998 ist, im Zuge eines Neubaus und einer Neukonzessionierung des Werkes, ein separate Ableitung des turbinierten Wassers in Betrieb genommen worden. Die Schwälle gelangen, nach kurzer Fliessstrecke im Ferrerabach, in ein Ausgleichsbecken und werden von dort aus in eine angrenzende Aue geleitet. Der an das Becken anschliessende, als Aufzuchtgewässer für Fische genutzte Teil des Ferrerabaches wird mit einer konstanten, den natürlichen Verhältnissen angepassten Niedrigwassermenge beschickt. Kurz vor der Mündung in den Vorderrhein gelangt ein Teil des über die Aue geleiteten Wassers wieder zurück in den Ferrerabach. Die im Werk verarbeitete Wassermenge wird gemessen, die Daten liegen aber noch nicht in einer für unsere Auswertungen geeigneten Form vor.
- Die Zentrale Islas des EW St. Moritz am Inn (GR). Schwallbetrieb herrscht jeweils im Winter. Das Verfahren für die Neukonzessionierung des Werkes ist noch im Gange. Die zwecks Schwalldämpfung aus gewässer- und fischökologischer Sicht empfohlenen Massnahmen (v.a. Erhöhung der minimalen Wasserrückgabe ab Zentrale, zusätzliche Abflusserhöhungen zwischen den täglichen Schwallspitzen und während der Laichzeit der Äschen, Begrenzung der Raten von Schwall-Anstieg und Rückgang) werden seit 1997 aufgrund einer Übergangsregelung bereits grösstenteils praktiziert. Die endgültige Entscheid über die zu treffenden Massnahmen steht jedoch noch aus.
- Die Zentrale Plan-Dessous der SEFA an der Aubonne (VD). Seit Anfang 2001 sind als schwalldämpfende Massnahmen in Betrieb: 1. eine beträchtliche Erhöhung der minimalen Wasserführung bei Sunk durch die Installation einer Niedrigwasser-Gruppe (groupe d'étiage) in der Zentrale; 2. eine ungewöhnlich starke Dämpfung des Schwall-Rückganges durch die Begrenzung der zulässigen Abnahmerate auf höchstens 1 m³/s pro Stunde. Der Schwall-Anstieg wird dagegen nicht reglementiert. Die Messung der im Werk verarbeiteten Wassermenge ist erst vor kurzem aufgenommen worden, und die Daten liegen noch nicht in einer für unsere Auswertungen geeigneten Form vor.

Bei den verbleibenden sieben Zentralen wurden verfügbare, elektronisch oder mechanisch registrierte Aufzeichnungen des Abflussverlaufes (Ganglinien) für die zwei ausgewählten Winterwochen vom 7.12. bis 13.12.2000 bzw. vom 22.2. bis 28.2.2001 ausgewertet.⁶ In den Abbildungen 1 bis 7 sind für diese Zentralen jeweils folgende Ganglinien dargestellt :

- Der tatsächliche Abflussverlauf im abturbinierten Betriebswasser am Ort der Rückgabe ins Gewässer. In dieser Ganglinie ist die Auswirkung der realisierten Massnahmen zur Schwalldämpfung bereits enthalten. Bei den Zentralen mit betrieblichen Massnahmen herrschen die entsprechenden Abflussverhältnisse schon am Turbinenauslauf („ab Zentrale effektiv“), in den Zentralen Linthal und Amsteg hingegen erst im Auslauf der nachgeschalteten Rückhalteräume („ab Ausgleichsbecken bzw. -kaverne“).

⁶ Anhand derselben Wochen wurden auch die Nutzungsverhältnisse näher untersucht (Kapitel 3). Die Zentrale Amsteg registrierte auf Grund eines technischen Defektes im Dezember 2000 nicht alle benötigten Daten, so dass in diesem Fall auf die Woche vom 23.11. bis 30.11.2000 ausgewichen werden musste.

- Der Abflussverlauf im Betriebswasser, wie er *ohne* die schwalldämpfenden Massnahmen am Ort der Rückgabe wäre oder sein könnte. Bei den Zentralen Linthal und Amsteg standen dafür die tatsächlichen Messwerte im Zulauf von Ausgleichsbecken bzw. -kaverne zur Verfügung („ab Turbine“), bei den übrigen Zentralen mussten die entsprechenden Abflüsse hergeleitet werden („ab Zentrale theoretisch“). Zu diesem Zweck wurde die Ganglinie des Betriebswassers überall dort rechnerisch korrigiert, wo sie offensichtlich durch die schwalldämpfenden betrieblichen Massnahmen bestimmt war: An Stelle der tatsächlichen wurde dabei eine Betriebsweise angenommen, welche die Kapazitäten und technischen Möglichkeiten des jeweiligen Kraftwerkes voll ausschöpft („worst case“).⁷
- Der Abflussverlauf im Rückgabe-Gewässer kurz nach dem Zufluss des Betriebswassers. Diese Ganglinien war nur für drei Zentralen mit einer flussabwärts anschliessenden hydrometrischen Messstation verfügbar (LHG, 2000/2001). In den übrigen Fällen ist angegeben, wieviel Wasser das Rückgabe-Gewässer vor dem Zufluss des Betriebswassers in abflussarmen Zeiten führt (Niedrigwasser, in der Regel bestehend aus einer allfälligen Dotierung bei der oberliegenden Fassung und der Abflusspende aus dem nicht genutzten Einzugsgebiet der Restwasserstrecke zwischen Fassung und Zentrale).

Tabelle 3 enthält neben ergänzende Angaben zu den ausgewerteten Zentralen und zur Art der Nutzung eine Zusammenstellung von charakteristischen, aus den Ganglinien berechneten Kennwerten für den jeweiligen Schwallbetrieb mit und ohne dämpfende Massnahmen. Aus diesen Darstellungen ist über Art und Ausmass des Schwallbetriebes sowie über die Wirkung der schwalldämpfenden Massnahmen (kurz Massnahmen) folgendes zu entnehmen.

- Der Abfluss im Rückgabegewässer vor der Zentrale ist – vom Flusskraftwerk Verbois ohne Ausleitungsstrecke abgesehen – bei winterlichem Niedrigwasser durchwegs gering bis sehr gering. Gemessen an der maximal möglichen Betriebswasser-Abgabe der Zentrale (Ausbauwassermenge) beträgt der Minimalabfluss vor Rückgabe zwischen 0.8 und 4 %. Dies würde *ohne* Massnahmen, d.h. ohne eine minimale Rückgabe ab Zentrale, zu Verhältnissen zwischen Maximalschwall und Minimalsunk von 25 : 1 bis >100 : 1 führen. Marrer (2000) erwartet in Gebirgsflüssen bis zu Verhältnissen von 4: 1 keine relevanten gewässerökologischen Auswirkungen, sofern ein ausreichend dichter Bewuchs von fädigen Algen erhalten bleibt.⁸
- Bei sechs der sieben ausgewerteten Zentralen ist, allein oder in Kombination mit anderen Massnahmen, eine erhöhte Mindest-Betriebswassermenge vorgeschrieben. Die Heraufsetzung der minimalen Rückgabe ab Zentrale ist damit klar die am häufigsten ergriffene schwalldämpfende Massnahme. Bei drei Zentralen wurde die festgesetzte Rückgabemenge während der zwei untersuchten Wochen durchgehend eingehalten und teilweise auch überschritten. In den übrigen drei Zentralen ging das Betriebswasser vereinzelt leicht bis deutlich unter den festgesetzten Wert zurück. Am stärksten war die Unterschreitung bei der Zentrale Amsteg, wo sich das Steuerungssystem für den Ablauf der Ausgleichskaverne offenbar noch in der Optimierungsphase befindet.
- Eine Begrenzung der maximalen Rückgabe unter den betrieblich bedingten Maximalabfluss (Ausbauwassermenge) ist nur in der Zentrale Amsteg (mit Ausgleichskaverne) als Massnahme vorgesehen. Der vorgeschriebene Höchstwert im Ablauf von 25 m³/s wurde im Verlauf der untersuchten zwei Wochen einige Male geringfügig überschritten. Bemerkenswert erscheint, dass auch der Zulauf zur Kaverne nur unwesentlich höher stieg und die Ausbauwassermenge ebenfalls bei weitem nicht erreichte. Mit Hauterive und Verbois blieben ausserdem zwei weitere Zentralen mit ihrem Betriebswasser immer deutlich unter dem theoretisch nutzbaren Maximalabfluss. Bei der Zentrale Linthal ist die Rückgabe ab Ausgleichsbecken zwar ebenfalls limitiert (auf 27 m³/s); bei Vollast-Betrieb gelangt aber über einen separaten By-Pass („Schütze B“) zusätzliches Be-

⁷ Insbesondere wurden die Raten von Schwall-Anstieg und -Rückgang auf das technisch mögliche Höchstmass und die minimale Rückgabe ab Zentrale auf Null gesetzt — letzteres mit Ausnahme des Flusskraftwerkes Verbois, welchem die natürliche Niedrigwasserführung der flussaufwärts zufließenden Arve als Minimalabfluss „belassen“ wurde.

⁸ Die konkreten Auswirkungen des Schwall:Sunk-Verhältnisses hängen naturgemäss sehr stark von der individuellen Situation ab (Gerinnegeometrie, Gefälle, Besiedlung etc.). Pauschale „Grenzwerte“ wie der vorliegende können deshalb ohne nähere Untersuchung des entsprechenden Gewässers nur der groben Orientierung dienen.

triebswasser ungedämpft in die Linth, wodurch deren Abfluss trotzdem um die volle Ausbauwassermenge von 33 m³/s ansteigen kann (Abbildung 3, Woche vom 22.2. - 28.2.01).

- Im effektiven Betrieb während der beiden Untersuchungswochen, also im Prinzip *mit* Massnahmen, lag das Verhältnis Maximalschwall : Minimalsunk noch zwischen 8 : 1 und 45 : 1 (entsprechend einem Anteil des minimalen am effektiv erfassten maximalen Abfluss von 2 bis 13 %). Die Erhöhung der minimalen bzw. Erniedrigung der maximalen Rückgabe ab Zentrale im bisher praktizierten Ausmass vermag damit das Verhältnis Schwall : Sunk oft deutlich zu „entschärfen“, führt die Nutzung als alleinige Massnahme damit aber noch keinesfalls in einen gewässerökologisch unbedenklichen Bereich.
- Weil die Erhöhung der minimalen Rückgabe gemessen an der maximalen durchwegs bescheiden ausfällt, wird auch die maximale Differenz zwischen Schwall- und Sunkabfluss durch diese Massnahme meist nur geringfügig erniedrigt. Ausnahmen stellen jene beiden bereits erwähnten Zentralen Hauterive und Verbois dar, deren Betriebswasser immer deutlich unter der Ausbauwassermenge blieb. Die Differenz der Wasserführung wirkt sich zwar nicht direkt auf die aquatische Lebensgemeinschaft aus; sie bestimmt aber weitgehend die Schwankungsbreite der gewässerökologisch sehr relevanten Breiten-, Tiefen- und Strömungsverhältnisse.
- Die theoretisch möglichen maximalen Geschwindigkeiten (Raten) des Übergangs zwischen Sunk und Schwall (Schwall-Anstieg) bzw. zwischen Schwall und Sunk (Schwall-Rückgang) beruhen auf groben, ungefähren Angaben zur benötigten Zeit für das Anfahren und Abstellen der Turbinen von Null- auf Vollast und umgekehrt. Diese Raten variieren, soweit bekannt, in einem grossen Bereich zwischen <1 und >50 m³/s pro Minute (m³/s·min). Marrer (1995) postuliert für die Schwallstrecke des Inn bei Celerina eine maximal zulässige Rate von 1 m³/s·min.⁹ Zum Vergleich: Beim regenbedingten Hochwasserereignis in der Orbe vom 8.12. - 10.12.00 (Abbildung 7) erreichte die Abflusszunahme im ansteigenden Ast maximal 0.4 m³/s·min und der Abflussrückgang im absteigenden Ast maximal 0.2 m³/s·min.
- In der Zentrale Verbois ist sowohl die Rate des Schwallanstiegs als auch des Schwallrückgangs über den gesamten nutzbare Abflussbereich limitiert, in der Zentrale Kubel nur jene des Rückgangs im Bereich relativ tiefer Abflüsse (unterhalb von ca. 20% der Ausbauwassermenge). In beiden Fällen liegen die geregelten Raten deutlich unter den theoretisch möglichen. Bei der Zentrale Le Châtelot ist nicht die Rate begrenzt, sondern eine „Zwangspause“ von jeweils einer Stunde zwischen dem Zurückfahren der zwei Turbinengruppen bzw. der zwei einzelnen Turbinen pro Gruppe vereinbart worden. Das Anfahren der Turbinen ist nicht reglementiert. Für diese Zentrale waren keine Angaben zu den theoretisch möglichen Raten erhältlich.
- Die während der zwei Untersuchungswochen erfassten, effektiven Raten bewegten sich sowohl beim Schwall-Anstieg als auch bei dessen Rückgang in einem ähnlichen Bereich von ca. 0.5 bis gut 10 m³/s·min. Sie blieben auch bei zwei Zentralen ohne entsprechende Massnahmen eindeutig unter den möglichen Maximalwerten zurück – darunter die Zentrale Linthal mit Ausgleichsbecken. Zu jenen beiden Zentralen, welche ihre theoretischen Raten im praktischen Betrieb nahezu erreichen, zählt überraschenderweise auch die Zentrale Amsteg mit einer erst vor wenigen Jahren in Betrieb genommenen Ausgleichskaverne. Es ist jedoch beizufügen, dass die Raten von Amsteg trotzdem zu den zwei tiefsten gehören und dass die Steuerung des Kavernenablaufes, wie schon erwähnt, noch weiter optimiert werden soll.
- Eine sehr viel weiter gehende Verlangsamung des Schwallrückgangs – nicht aber des Schwallanstiegs – ist den vorliegenden Angaben zufolge bei der Zentrale Plan-Dessous an der Aubonne verfügt worden. Die maximal zulässige Rate beträgt dort 1 m³/s und Stunde oder umgerechnet <0.02 m³/s·min. Da diese Bestimmung erst seit kurzem in Kraft ist und umgesetzt wird, standen für die Überprüfung der tatsächlichen Verhältnisse im Betriebswasser noch keine geeigneten Daten zur Verfügung. Die Auswertung der Abflussganglinie in der Aubonne nach der Zentrale für die Woche

⁹ Dieser Richtwert ist ebenfalls stark vom jeweiligen Gewässer abhängig und hat lediglich orientierenden Charakter. Dies gilt umso mehr, als eigentlich nicht die Geschwindigkeit der Abfluss-, sondern jene der Wasserstandsänderung die ökologisch massgebliche Grösse ist: Sie bestimmt zusammen mit der Gerinnegeometrie darüber, wie rasch die wechselfeuchten Zonen bei Schwallanstieg überflutet werden und bei Schwallrückgang trockenfallen. Beim Inn entspricht die geforderte maximale Abflussänderung von 1 m³/s·min einer Änderung der Wasserlinie (bezogen auf die benetzte Breite) von 1 m/min.

vom 22.2. - 28.2.01 ergab aber effektiv sehr geringe maximale Werte für die Raten des Abfluss-Rückgangs ($0.07 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{min}$) und -Anstiegs ($0.23 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{min}$).

- Die Raten von Schwallanstieg und -rückgang werden damit in etlichen der untersuchten Zentralen vergleichsweise tief gehalten, sei es aufgrund entsprechender Auflagen oder aufgrund der „normalen“ Betriebsweise. Dennoch liegt die Geschwindigkeit der Abfluss- und damit der Wasserstandveränderung in der Mehrzahl der Fälle immer noch in einem gewässerökologisch relevanten Bereich.
- Eine Durchsicht der Abbildungen 3 bis 7 macht auf einen Blick deutlich, dass die effektiven Ganglinien des Betriebswassers bei den gewählten Darstellungsverhältnissen (Wochenverläufe) nur in mehr oder weniger grossen Einzelheiten und teils fast unmerklich von der theoretisch möglichen „worst-case“-Situation abweichen. Diese Abweichungen ergeben sich aus den vorstehend besprochenen, einzelnen Massnahmen. Ein grundsätzlich anderer Abflussverlauf im zurückgegebenen Betriebswasser und damit ein eigentliches Durchbrechen der Schwallcharakteristik ist jedoch an gewissen Tagen im Auslauf des Ausgleichsbeckens Linthal festzustellen. Dieses Becken mit einem Inhalt¹⁰ von $220'000 \text{ m}^3$ vermag das aus der Zentrale stammende, stark schwankende Betriebswasser an Tagen mit geringer Produktion praktisch zu vergleichmässigen (so vom 7.12. - 11.12.00 und über das Wochenende vom 24./25.2.01; Abbildung 3). Bei mittlerer Produktion wird die zufließende, extrem blockartige Ganglinie immer noch recht stark ausgeglichen (12./13.12.00), während zu Spitzenzeiten unter Einrechnung des separat abgeleiteten Wassers („Schütze B“) nur mehr eine schwächere, aber immerhin noch deutlich erkennbare Dämpfung besteht. Weil die Schwall-Kennwerte in Tabelle 3 v.a. durch diese Zeit der Spitzenproduktion bestimmt werden, tritt der Effekt des Ausgleichsbeckens in der grafischen Darstellung insgesamt wesentlich besser zutage. Auf den „umgekehrten“ Fall der Zentrale Amsteg, deren – mit $8'000 \text{ m}^3$ Nutzinhalt um einiges kleinere – Ausgleichskaverne eine vergleichsweise sehr geringe Wirkung auf die Abflussverlauf des Betriebswassers ausübt, ist schon hingewiesen worden.
- In der Zentrale Verbois sind neben den schon genannten noch einige weitere schwalledämpfende Massnahmen in Kraft. Dazu zählen eine maximal zulässige Rate für die Veränderung des Pegelstandes in der Stauhaltung Verbois von 15 cm/h sowie eine Begrenzung der momentanen Betriebswassermenge auf einen Wert, der höchstens $200 \text{ m}^3/\text{s}$ über dem (bis dahin registrierten) mittleren Tagesabfluss der Rhone liegen darf.

¹⁰ Der Auslauf des Ausgleichsbeckens Linthal wird energetisch nicht mehr genutzt. Im Gegensatz dazu verfügt die Ausgleichskaverne Amsteg in ihrem Auslauf über eine spezielle „Dotiergruppe“ zur nochmaligen Turbinierung des abgegebenen Wassers (Tabelle 3).

Tabelle 3

Angaben zu den ausgewerteten Zentralen mit schwalldämpfenden Massnahmen. Die Schwall-Kennwerte für den Zustand *mit* Massnahmen (=effektiv) wurden aus den tatsächlichen Abflusswerten für zwei ausgewählte Wochen im Dezember 2000 und im Februar 2001 ermittelt. Die möglichen Kennwerte für den Zustand *ohne* Massnahmen (=theoretisch) wurden in der Regel aus den effektiven Werten hochgerechnet. Im Gegensatz dazu beruhen die Angaben für die Zentralen Linthal und Amsteg nicht auf berechneten, sondern auf den beim Einlauf zu Ausgleichsbecken bzw. -kaverne gemessenen Abflusswerten. Die Abkürzungen der Kraftwerks-Gesellschaften stammen aus BWB (1991). AGB = Ausgleichsbecken; AGK = Ausgleichskaverne; k.A. = keine Angabe.

Allgemeine Angaben zu Zentrale und Nutzung							
Kanton	FR	GE	GL	NE	SG	UR	VD
Rückgabe-Zentrale	Hauterive	Verbois	Linthal	Le Châtelot	Kubel	Amsteg	Le Chalet
Kraftwerks-Gesellschaft	EEF	SIG	KLL	SFMC	SAK	SBB	UO
Kraftwerkstyp	Speicher	Fluss	Speicher	Speicher	Speicher	Speicher	Lauf
Ausbauwassermenge [m ³ /s]	75	620	33	44	18	50	18.5
Art und Anzahl Turbinen in Zentrale	5 x Francis	4 x Kaplan	2 x Francis	4 x Francis	3 x Francis	3 x Pelton	2 x Kaplan
Art und Anzahl Turbinen nach Ausgleichskaverne						2 x Rohr	
Minimale Dotierung ab Fassung [m ³ /s]	1	—	0	0.25	0.13	1.2	0
Art der Schwall-Massnahmen:	Betrieb	Betrieb	Bau (AGB)	Betrieb	Betrieb	Bau (AGK)	Betrieb
Begrenzung Rückgabe auf maximal [m ³ /s]			27			25	
Erhöhung Rückgabe auf minimal [m ³ /s]	4	60 - 100	1		1 - 2	2	2
Dämpfung Schwall-Anstieg auf max. [m ³ /s·min]		2.5 ¹⁾					
Dämpfung Schwall-Rückgang auf max. [m ³ /s·min]		2.5 ¹⁾			0.1 ¹⁾		
Unterbruch Schwall-Rückgang durch Pause von [h]				2 x 1			
Anderere, u.U. schwallbeeinflussende Massnahmen		ja					
Massnahmen in Betrieb seit / geplant auf	1973	ca. 1985	1963	1998	1976	1998	ca. 1986
Massnahmen festgehalten / vorgeschrieben in	k.A.	Konzession	Konzession	Vereinb. ⁴⁾	Konzession	Konzession	Konzession

Erfasste Schwall-Kennwerte mit Dämpfungsmassnahmen bei Winterbetrieb (=effektiv)							
Mögliche Schwall-Kennwerte ohne Dämpfungsmassnahmen bei Winterbetrieb (= theoretisch)							
Maximale Rückgabe ab Zentrale [m ³ /s]	56	521	31.8 ⁶⁾	43.5	17.7	28.8	18.1
	75	620	32	44	16	33.2	18.5
Minimale Rückgabe ab Zentrale [m ³ /s]	3.5	67	1.7	0	1.3	0	0.6
	0	30	0	0	0	0	0
Minimalabfluss vor Rückgabe [m ³ /s]	>1	—	0.6	ca. 1	0.7	1.2	0.14 ⁵⁾
	>1	ca. 30	0.6	ca. 1	0.7	1.2	0.14 ⁵⁾
Maximale Differenz Schwall - Sunk [m ³ /s]	52.5	454	30.1	42.5	16.4	28.8	17.5
	75	590	32	44	16	33.2	18.5
Maximalschwall : Minimalsunk [m ³ /s]	57 : 4.5	521 : 67	32.4 : 2.3	44.5 : 1	18.4 : 2	30 : 1.2	18.2 : 0.7
	76 : 1	620 : 30	33 : 0.6	45 : 1	16.7 : 0.7	34.4 : 1.2	18.6 : 0.1
Maximalschwall : Minimalsunk [x : 1]	13 : 1	8 : 1	14 : 1	45 : 1	9 : 1	25 : 1	26 : 1
	76 : 1	21 : 1	55 : 1	45 : 1	24 : 1	29 : 1	>100 : 1
Maximale Rate Schwall-Anstieg [m ³ /s·min]	2.5	9.1 ¹⁾	6.7	13.1	0.5	0.5	2.9
	15	>50	16	k.A.	3.2	0.86	3.7
Maximale Rate Schwall-Rückgang [m ³ /s·min]	2.8	10.3 ³⁾	3.6	6.2	0.6 ²⁾	0.6	2.5
	15	>50	16	k.A.	6.4	0.76	3.7

Anmerkungen:

- 1): Gilt nur für Rückgang von 4 auf 2 m³/s. Für weiteren Rückgang von 2 auf 1 m³/s wird Rate auf 0.05 m³/s·min reduziert (seltener Fall).
- 2): Gilt für den nicht geregelten Bereich zwischen Abflüssen über 4 m³/s.
- 3): Maximal zulässige Veränderung: ±50 m³/s innert 20 min. Die effektiv erfassten Veränderungen beziehen sich auf kürzere Messintervalle und können deshalb grösser sein.
- 4): Vereinbarung zwischen der Commission mixte franco-suisse und der SFMC gemäss Protokoll vom 27.5.1998.
- 5): Zusammengesetzt aus geringen Fassungsverlusten sowie dem Durchfluss der Fischtreppe (0.125 m³/s), die gegenüber der Zentrale einmündet.
- 6): Einschliesslich eines Umgehungskanals neben dem Ausgleichsbecken. Dieser sogenannte "Schütze B" entlastet bei hohem Abfluss einen Teil des turbinieren Wassers direkt in die Linth. Der maximale Abfluss aus dem Ausgleichsbecken betrug während der zwei erfassten Wochen 24.2 m³/s.

Abbildung 1

Abflüsse der Zentrale Hauterive (FR) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

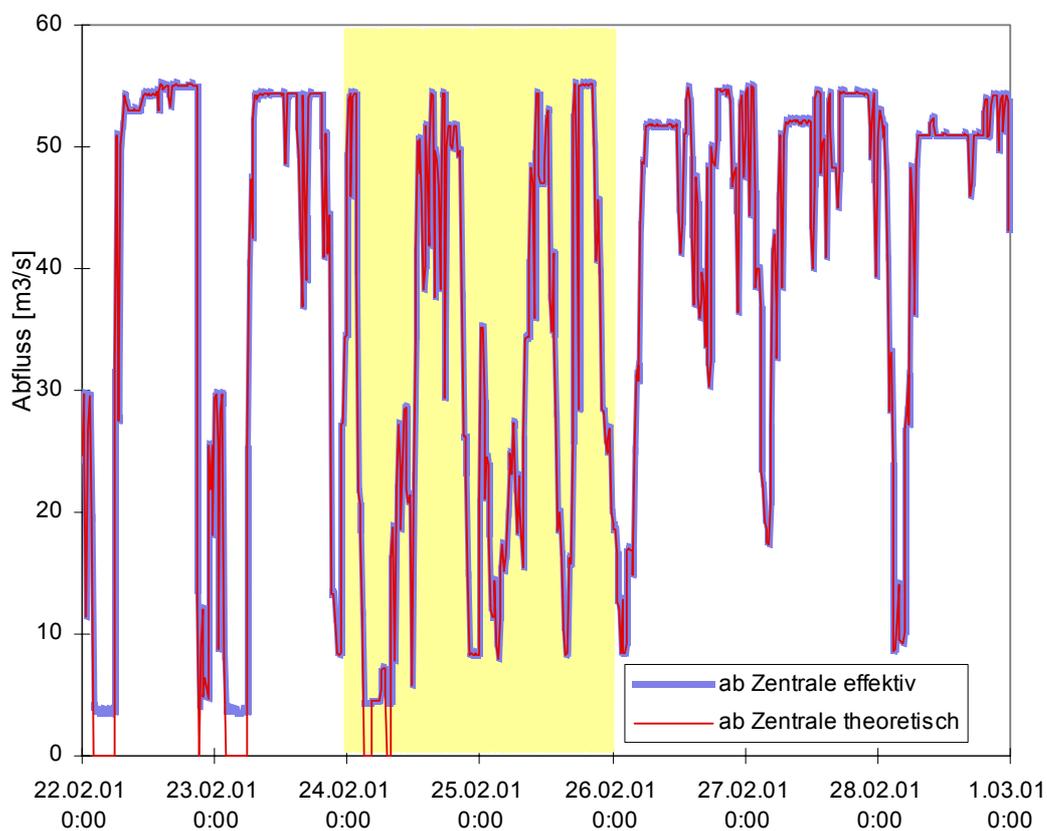
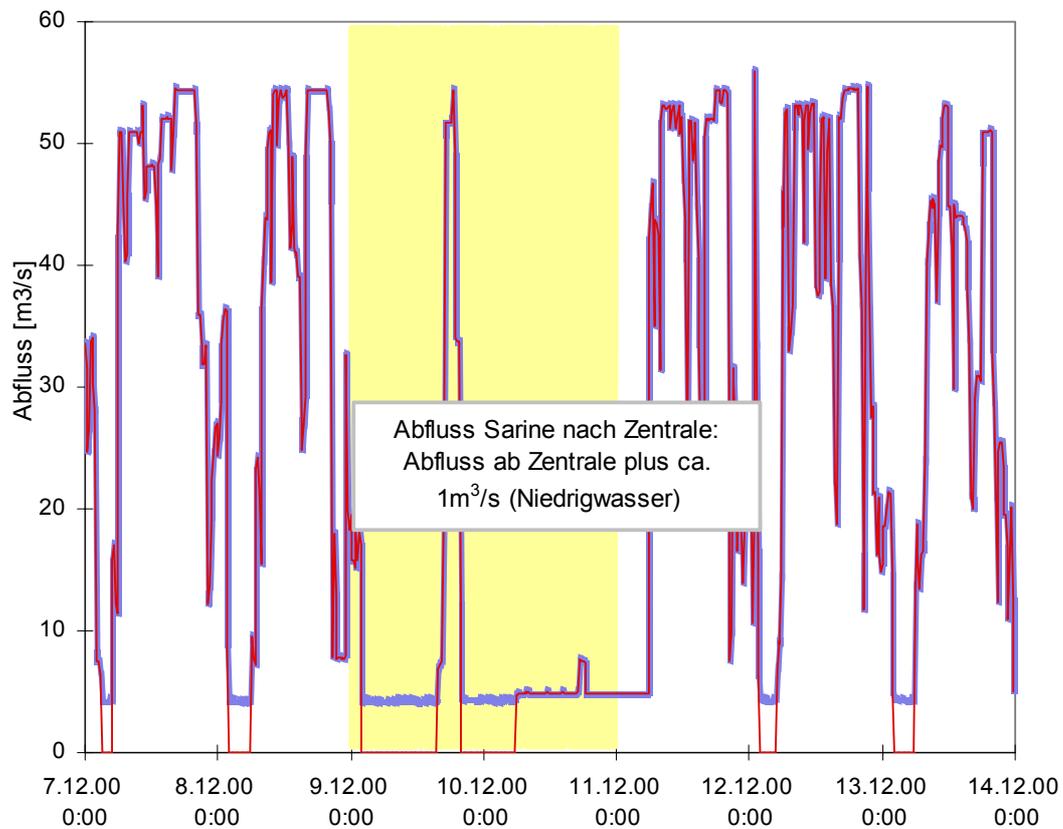


Abbildung 2

Abflüsse der Zentrale Verbois (GE) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

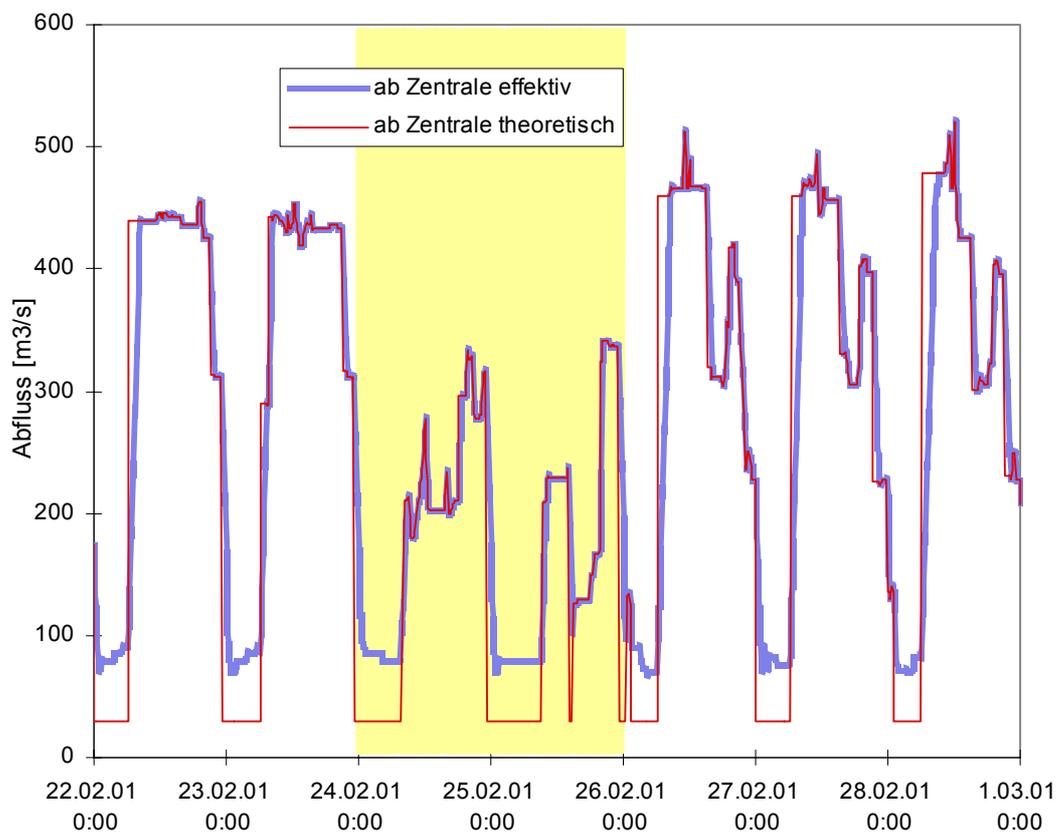
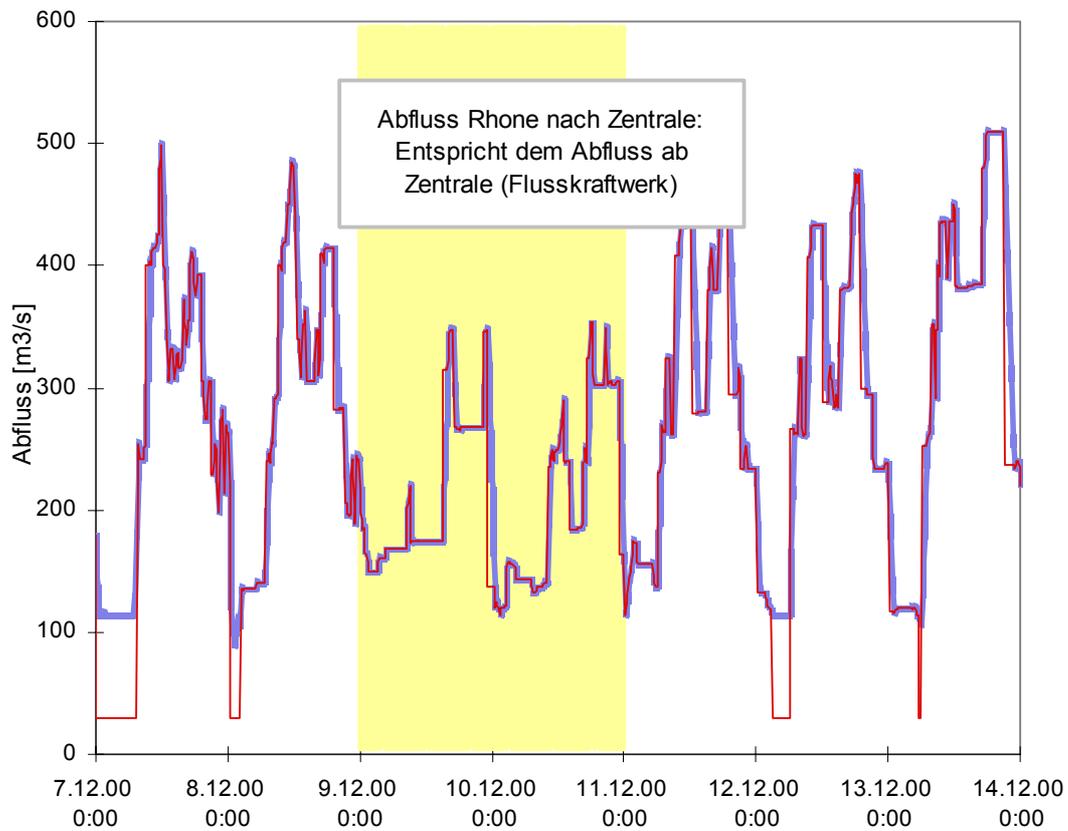


Abbildung 3

Abflüsse der Zentrale Linthal (GL) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

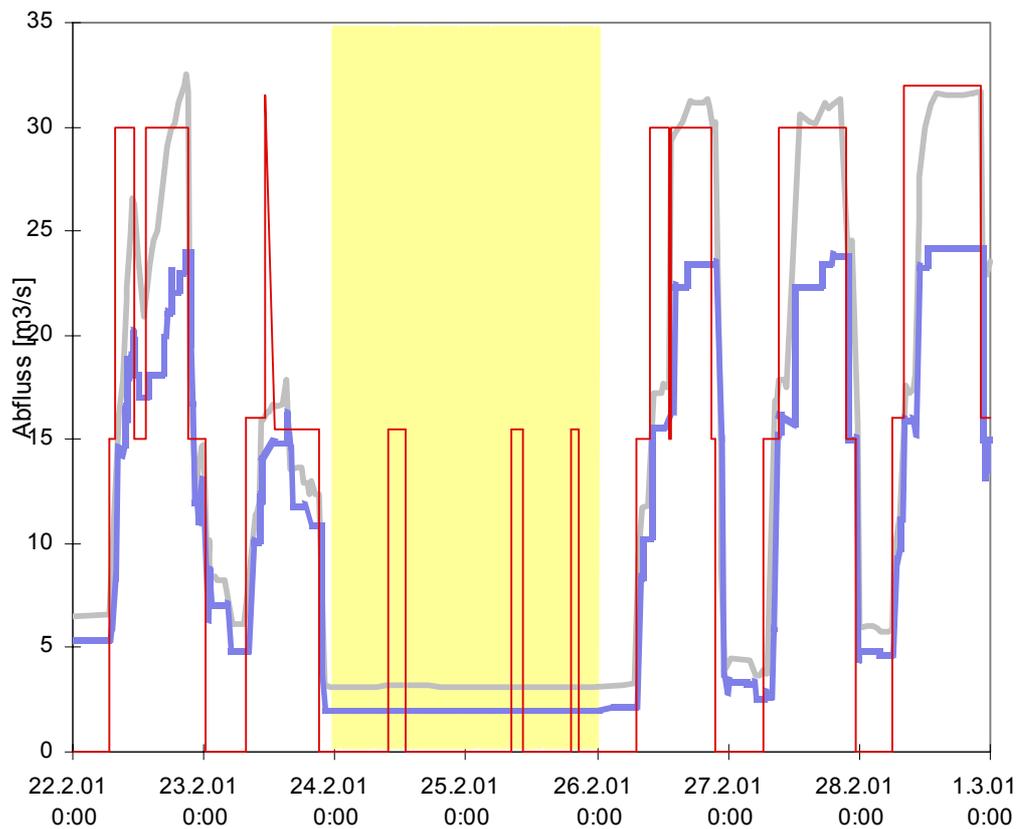
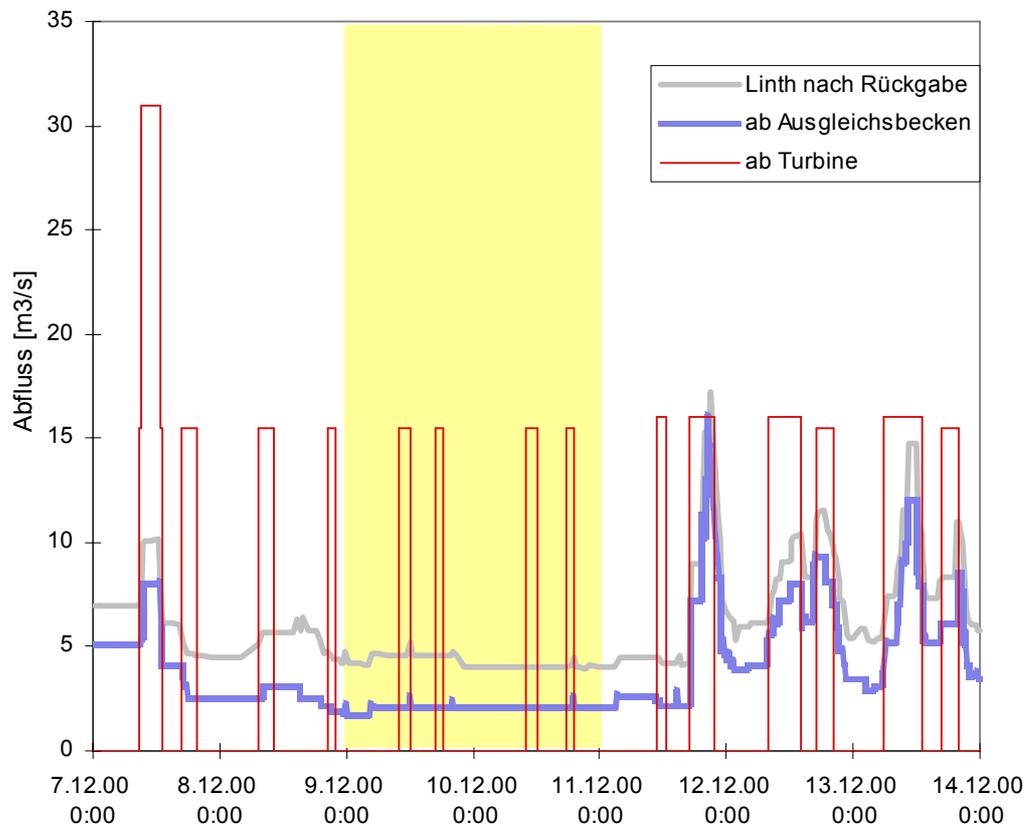


Abbildung 4

Abflüsse der Zentrale Le Châtelot (NE) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

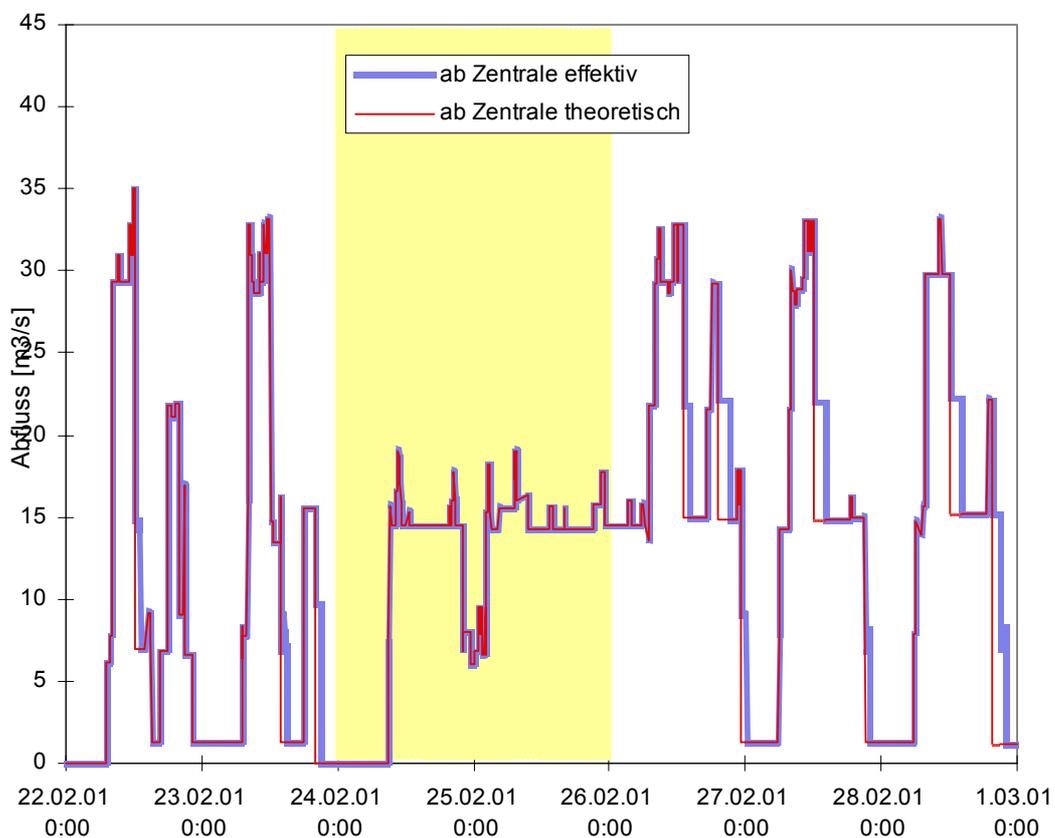
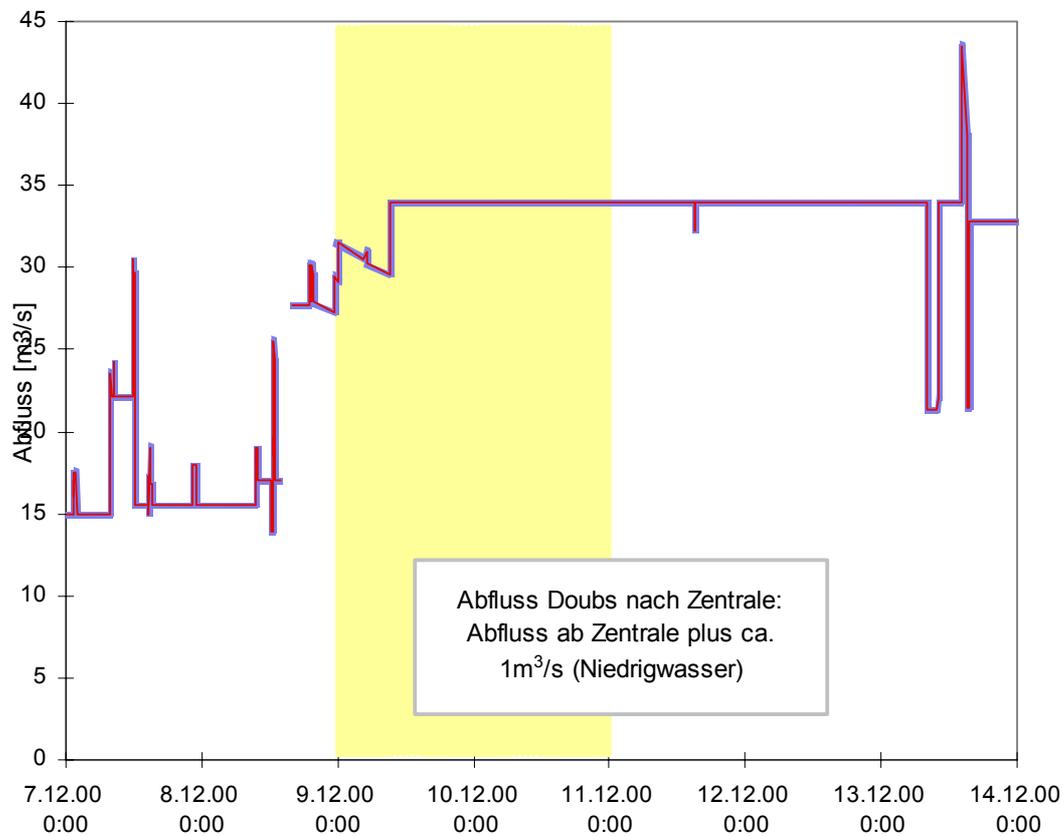


Abbildung 5

Abflüsse der Zentrale Kubel (SG) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

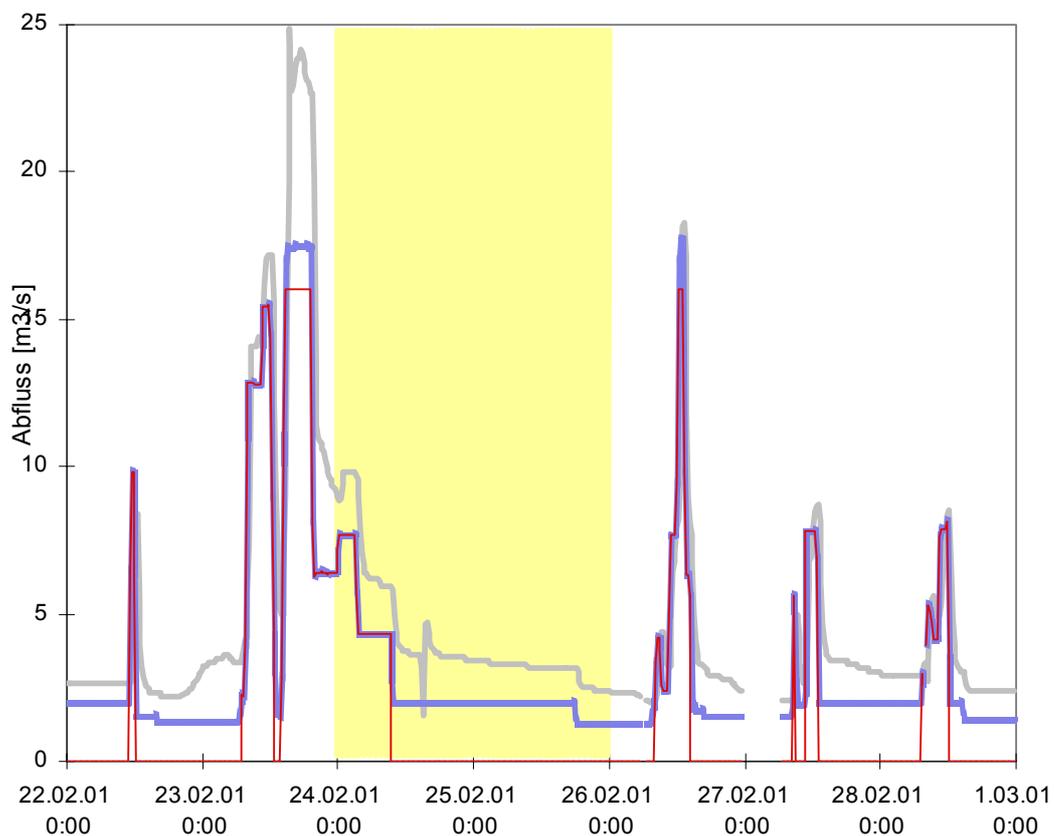
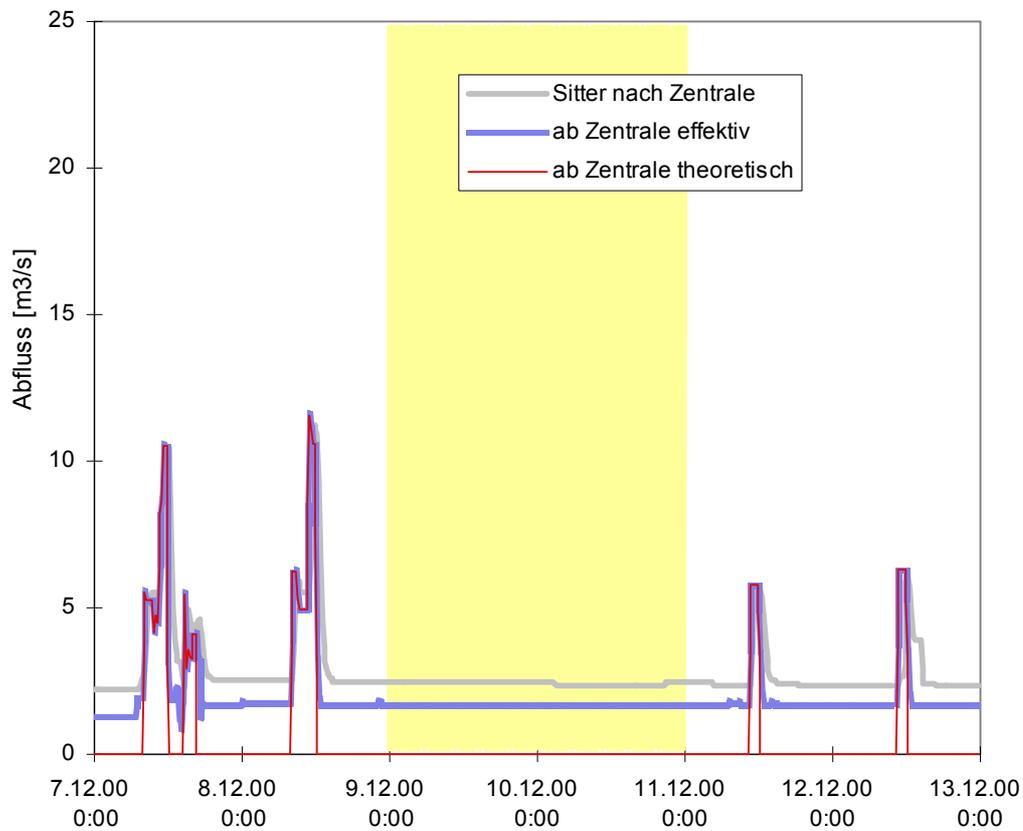


Abbildung 6

Abflüsse der Zentrale Amsteg (UR) *mit* schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und *ohne* Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.

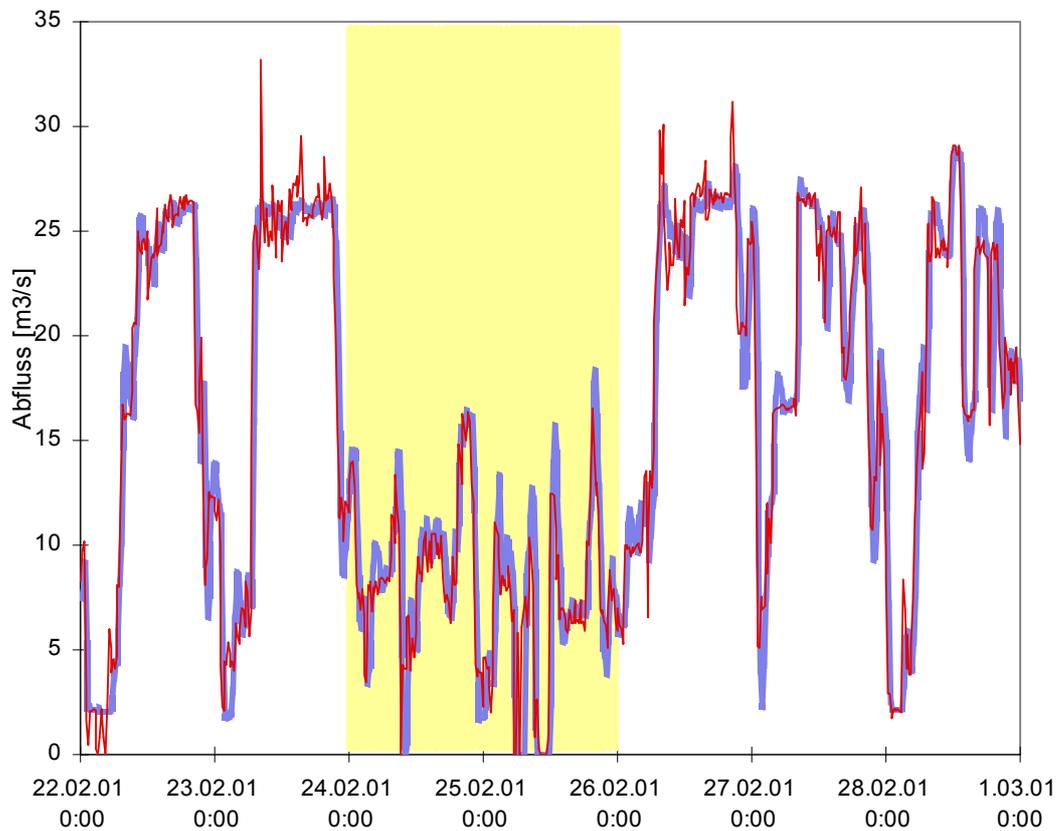
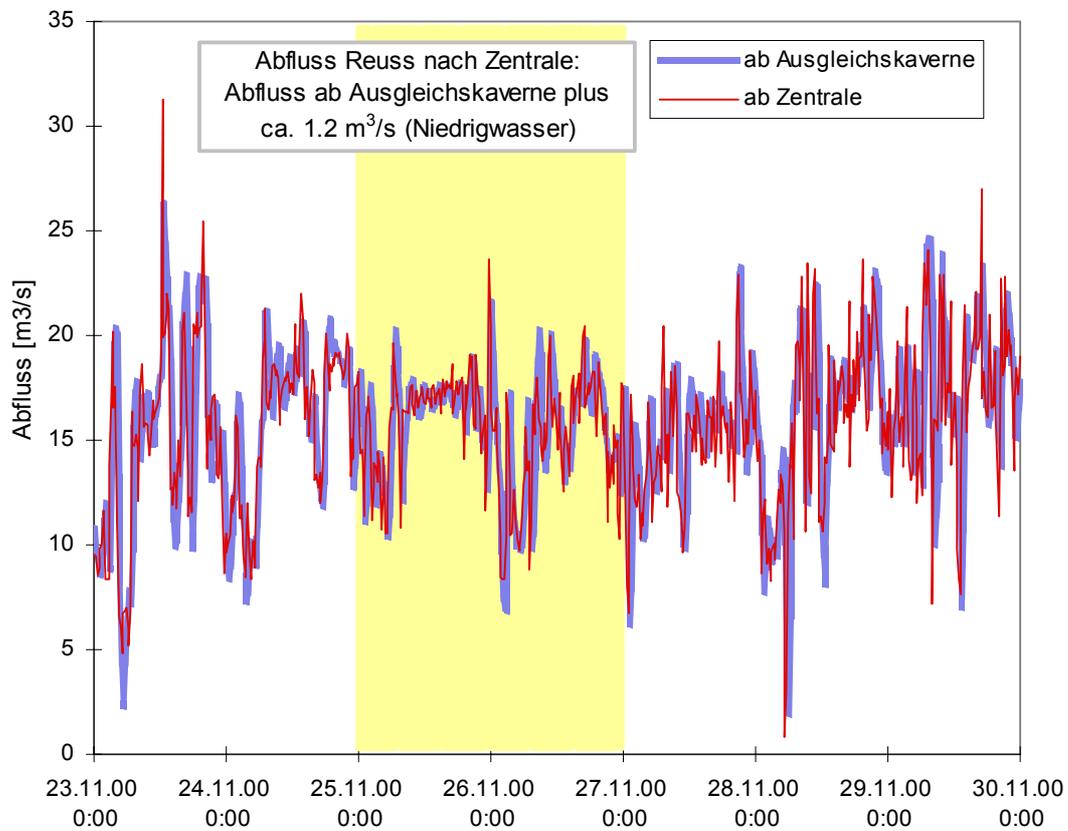
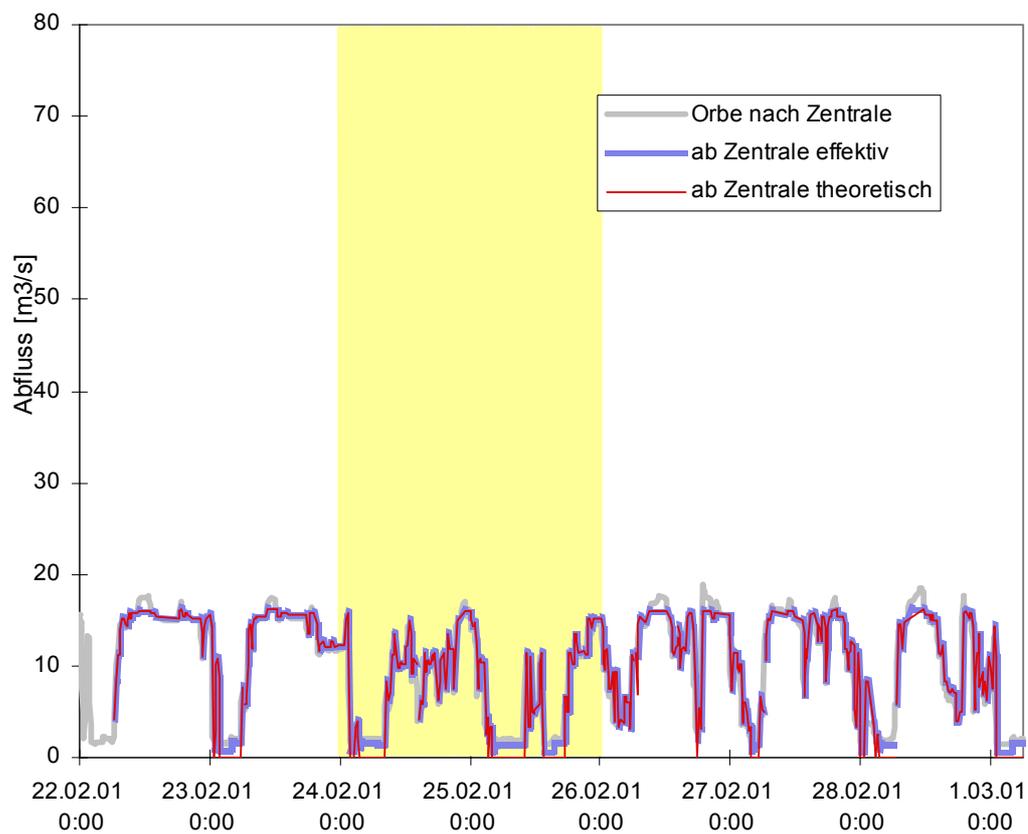
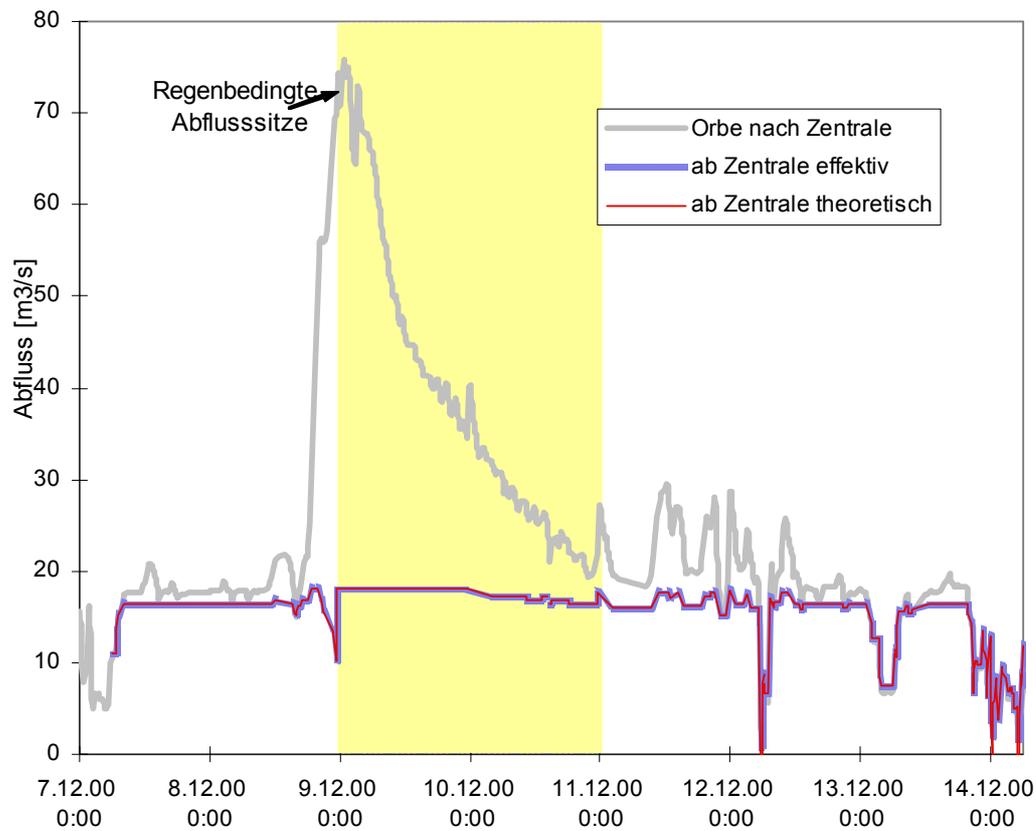


Abbildung 7

Abflüsse der Zentrale Le Chalet (VD) mit schwalldämpfenden Massnahmen (= effektiv) und ohne Massnahmen (=theoretisch) für zwei ausgewählte Winterwochen. Das Wochenende ist gelb hinterlegt.



5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Bericht wurde versucht, die Aspekte von Art und Ausmass des Schwallbetriebes sowie die Wirkung von bisher realisierten schwalldämpfenden Massnahmen auf die Abflussverhältnisse näher zu beleuchten. Dabei hat sich gezeigt, dass die Schwallproblematik schon rein „quantitativ“ von Bedeutung ist, sind doch schätzungsweise 25 % der schweizerischen Kraftwerkzentralen schwallerzeugend und 30 % der hydrologisch überwachten Gewässerstrecken schwallbeeinflusst. Ein Schwallregime weisen dabei vorab jene grösseren Bäche und Flüsse in den Talsohlen auf, an denen sich auch andere menschliche Eingriffe und Nutzungen kumulieren (Begradigung, Verbauung, Abwassereinleitungen etc.).

In „qualitativer“ Hinsicht wurde festgestellt, dass die untersuchten hydrologischen Schwall-Kennwerte bei sieben ausgewählten schweizerischen Kraftwerks-Zentralen *ohne* den Einfluss von schwalldämpfenden Massnahmen durchwegs in einem gewässerökologisch hoch relevanten Bereich liegen. Dies dürfte auch für die meisten der übrigen, nicht durch Massnahmen gedämpften Schwall-Rückgaben zutreffen.

Die meisten denkbaren Arten von Massnahmen zur Dämpfung eines gegebenen Schwallbetriebes sind in der Schweiz schon in einer oder mehreren Zentralen realisiert worden (Tabelle 4). Bei den sieben näher ausgewerteten Zentralen waren die Auswirkungen dieser Massnahmen auf die Schwall-Kennwerte sehr unterschiedlich: Das maximale Verhältnis von Schwall- zu Sunkabfluss und die maximale Rate des Schwall-Rückganges konnten in einigen Fällen deutlich bis stark vermindert werden. Dennoch verblieben diese Kennwerte auch *mit* Massnahmen noch in einem gewässerökologisch relevanten Bereich. Die maximale Differenz zwischen Schwall- und Sunkabfluss wurde durch die Massnahmen generell nur geringfügig herabgesetzt. Zuweilen wurde eine massnahmebedingte Verbesserung gar nur vorgetäuscht, z.B. wenn die maximale Rate von Schwall-Anstieg bzw. -Rückgang schon im Normalbetrieb weit unter dem theoretisch möglichen Wert lag. Das zeigt, dass die berechneten, auf einem „worst-case“-Szenario beruhenden Ganglinien nicht immer einer realistischen Betriebsweise entsprechen und demgemäss nur mit Vorbehalt zu verwenden sind. Ausnahmen stellen die Zentralen Linthal und Amsteg dar, bei denen der Abflussverlauf *ohne* Massnahmen nicht berechnet werden musste, sondern durch die Messwerte im Zulauf von Ausgleichsbecken bzw. -kaverne gegeben war.

Die dargestellten Schwall-Kennwerte dienen ausdrücklich nur einer ersten, orientierenden Einstufung des jeweiligen Schwallbetriebes. Keinesfalls kann aus ihnen allein auf die gewässerökologischen Auswirkungen im Einzelfall geschlossen werden. Dazu ist und bleibt eine eingehende Untersuchung des individuellen Gewässers unumgänglich

In der Schweiz ist bereits eine ganze Reihe von gewässerökologischen Untersuchungen an Schwallstrecken durchgeführt worden (Tabelle 1). Im Rahmen des Projektes Ökostrom der EAWAG konnten acht dieser angewandten Schwalluntersuchungen aus jüngerer Zeit¹¹ in methodischer Hinsicht ausgewertet und untereinander verglichen werden (Limnex, 2000a). Dabei wurden die eingesetzten Feldaufnahme- und Berechnungsmethoden sowie die bei der Beurteilung herangezogenen Referenzzustände geprüft. Eine *inhaltliche* Synthese über die gewässerökologischen Auswirkungen des Schwallbetriebes in den einzelnen Fällen war im Rahmen dieser Auswertung hingegen *nicht* möglich.

Untersuchungen über die Auswirkungen von schwalldämpfenden Massnahmen auf die abiotischen und biotischen Verhältnisse im Rückgabegewässer (Erfolgskontrollen) liegen unseres Wissens bisher erst von der Sitter nach der Zentrale Kubel vor (Limnex, 2000b).¹² Die übrigen Schwallstrecken wurden *vor* Inkrafttreten und zumeist im Hinblick auf die Ausgestaltung dieser Massnahmen untersucht (z.B. im Rahmen von Umweltverträglichkeits-Berichten). In der Reuss unterhalb der Zentrale Amsteg sind zu diesem

¹¹ Zwei davon betrafen die Zentralen Kubel und Amsteg, die auch im vorliegenden Bericht behandelt werden.

¹² Eine weitaus umfassendere Studie zum Schwallbetrieb und gleichzeitig Erfolgskontrolle der schwalldämpfenden Massnahme (Ausgleichsbecken) wurde am österreichischen Kraftwerk Alberschwende an der Bregenzerach durchgeführt (BOKU, 1998).

Zweck umfangreiche Schwallversuche durchgeführt worden, über deren Resultate ein Zwischenbericht vorliegt (Marré, 2000). Die vorliegende Studie hat ergeben, dass die aufwendigen baulichen Massnahmen in der Zentrale Amsteg (Ausgleichskaverne) bislang noch nicht zu einer wesentlichen Dämpfung des Schwalleffektes geführt haben. Eine eigentliche Erfolgskontrolle wird in diesem Fall erst möglich sein, wenn die gegenwärtig laufende Optimierung der Abflusssteuerung abgeschlossen ist.

Die wirkungsvollsten unter den ausgewerteten schwallydämpfenden Massnahmen sind zur Zeit in den Zentralen Verbois (GE), Linthal (GL) und Sitter (SG) in Betrieb. Die ebenfalls umfangreichen, bestehenden und teilweise geplanten Massnahmen in den Zentralen Trun-Ferrera (GR), Islas (GR) und Plan-Dessous (VD) konnten in der vorliegenden Studie noch nicht berücksichtigt werden. Da über die gewässerökologische Wirksamkeit von schwallydämpfenden Massnahmen somit erst wenig bekannt ist, erscheint eine Erfolgskontrolle an zwei bis drei weiteren Zentralen (neben der bereits untersuchten Zentrale Kubel) angezeigt. Im Vordergrund stehen dabei zwei Zentralen, deren Schwälle zumindest zeitweise (bei Linthal) oder in bezug auf bestimmte Kennwerte (Rate des Schwall-Rückgangs bei Plan-Dessous) im höchstmöglichen Ausmass gedämpft werden. Bei der Zentrale Linthal bestünde darüber hinaus die Möglichkeit, mit Hilfe des Ausgleichsbeckens Schwallversuche über einen grossen Abflussbereich durchzuführen. Derartige Untersuchungen bzw. Versuche hätten zum Ziel,

- die Auswirkungen unterschiedlicher Schwälle und die Wirksamkeit unterschiedlicher schwallydämpfender Massnahmen zu erfassen;
- jene Kennwerte des Schwallbetriebes *und* Randbedingungen im Rückgabegewässer näher einzugrenzen, die zur Vermeidung der grössten ökologischen Schäden (wie etwa Trockenfallen von Fischen bei Schwall-Rückgang oder Auslösung von massiver Wirbellosen-Drift bei Schwall-Anstieg) erfüllt sein müssen.

Die methodischen Grundlagen für die Ausarbeitung eines entsprechenden Untersuchungskonzeptes sind in Limnex (2000a) zusammengestellt.

Begleitend und ergänzend zu diesen Untersuchungen sollte sodann die bisher noch fehlende, *inhaltliche* Auswertung der bestehenden gewässerökologischen Untersuchungen aus der Schweiz und dem übrigen Alpenraum (v.a. aus Österreich) vorgenommen werden. Eine derartige Literaturstudie würde etwa die folgenden Aspekte umfassen:

- Beschreibung und Einteilung (Kategorisierung) der Schwallstrecken an möglichst vielen, mittleren bis grösseren Gewässern der Schweiz aufgrund des Gewässertyps (Abfluss-Kennwerte, soweit verfügbar Flussordnungs-Zahl und biozönotische Flussregion, allenfalls Verbauungsgrad und Wasserqualität) sowie aufgrund von Art und Ausmass des Schwallbetriebes (Höhe und zeitliche Verteilung der Schwall- bzw. Sunkabflüsse, Verlauf von Schwallbeginn und -ende). Aus dieser groben Bestandesaufnahme sollen sich möglichst jene Schwall/Sunk-Situationen herauskristallisieren, welche für schweizerische Verhältnisse am ehesten typisch sind.
- Identifizierung und Zusammenstellung der morphologischen, hydraulischen, physikalisch-chemischen und biologischen Auswirkungen, welche an konkret untersuchten, schwallbeeinflussten Gewässern festgestellt worden sind. Darunter fallen als strukturelle Parameter z.B. Veränderungen der Breiten-, Tiefen-, Strömungs-, Substrat- und Temperaturverhältnisse, der Wasserqualität sowie der Menge und Zusammensetzung von Gewässerflora und -fauna. Zu berücksichtigende funktionelle Grössen sind etwa die Einflüsse auf den Feststoffhaushalt (Geschiebetrieb) oder auf Verhaltensweisen (Fischwanderungen, Invertebratendrift) und Entwicklungszyklen von Organismen. Grundsätzlich zu unterscheiden ist ausserdem zwischen Auswirkungen qualitativer und quantitativer Art. Durch eine Zusammenstellung in standardisierter, tabellarischer Form sind die verschiedenen Gewässer möglichst direkt untereinander zu vergleichen.
- Suche nach Beziehungen zwischen Gewässertyp und Ausprägung des Schwallbetriebes auf der einen sowie Art und Schwere der festgestellten Auswirkungen auf der anderen Seite. Je nach Umfang der Datenbasis und Streuung der Einzelwerte können offenkundige bzw. vermutete Zusammenhänge entweder verbal oder als mathematische Funktionen beschrieben und dargestellt werden.

Dies wäre gewissermassen die „logische“ Fortsetzung der vorliegenden Grundlagenstudie zu den hydrologischen und technischen Aspekten des Schwallbetriebes. Sie hätte zum Ziel, den aktuellen Kenntnisstand bzw. die bestehenden Kenntnislücken bezüglich schwallbedingter Veränderungen in der ökologischen Struktur und Funktion unserer Fliessgewässer aufzuzeigen. Sie würde damit unter anderem auch Beurteilungs- und Entscheidungsgrundlagen bereistellen für die Vollzugsbehörden in den Bereichen Fischerei, Gewässernutzung sowie Gewässer- und Umweltschutz.

Tabelle 4

Mögliche und in der Schweiz umgesetzte Massnahmen zur Dämpfung der Schwallauswirkungen. Aus Limnex (2000a), verändert und ergänzt.

Ziele	Art der Massnahmen	Umsetzung	Beispiele (Zentralen)
1 "Umleitung" des Schwalls	a) Separate Ableitung Betriebswasser (oder eines Teils davon)	Stollen zu grösserem Fluss oder See Bewässerung einer Aue	— Trun-Ferrera (GR)
2 Verminderung von Schwall/Sunk-Differenz bzw. -Verhältnis	b) Erhöhung der Mindestwasserführung	Zusätzliche Dotierung ab Wehr	—
		Höhere minimale Rückgabe ab Zentrale	Hauterive (FR) Verbois (GE) Islas (GR) Kubel (SG) Le Chalet (VD) Plan-Dessous (VD)
	c) Verminderung der Schwallspitzen	Geringere maximale Rückgabe ab Zentrale	—
d) Kombination von b) und c)	Kombination als betriebliche Massnahme	—	
	Ausgleichsbecken als bauliche Massnahme	Linthal (GL) Amsteg (UR)	
3 Gezielte saisonale Verbesserung	e) wie b) und/oder c), aber zeitlich begrenzt (z.B. auf Laichperioden)	Zusätzliche minimale Rückgabe ab Zentrale	Islas (GR)
		Zusatzbeschränkung Rückgabe / Kombination	—
4 Dämpfung Schwall/Sunk-Übergang	f) Begrenzung der Rate von Schwall-Anstieg und/oder -Rückgang	Langsameres Anfahren der Turbinen	—
		Langsameres bzw. stufenweises Zurückfahren der Turbinen	Le Châtelot (NE) Kubel (SG) Plan-Dessous (VD)
		Kombination als betriebliche Massnahme	Verbois (GE) Islas (GR)
		Ausgleichsbecken als bauliche Massnahme	Linthal (GL) Amsteg (UR)

6. Literaturverzeichnis

- BOKU (1998): Limnologische Gesamtbeurteilung des KW Alberschwende. Synthesis. Bericht der Universität für Bodenkultur Wien im Auftrag der Vorarlberger Kraftwerke AG. 538 Seiten.
- BWG (1992-2001): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Herausgegeben und aktualisiert vom Bundesamt für Wasser und Geologie sowie von der schweizerischen Landeshydrologie, Bern. Ringordner mit Loseblättern.
- BWW (1968): Natürliche und durch Ableitungen beeinflusste Wasserführung der schweizerischen Gewässer (Stand 1.1.1967). Mitteilung des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft Nr. 45, Bern. 28 Seiten + Karten.
- BWW (1973): Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (Stand 1.1.1973). Herausgegeben vom Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern. 213 Seiten + Karten.
- BWW (1991): Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz, Teil Zentralen (Stand 29.1.1991). Herausgegeben vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern. Ringordner mit Loseblättern.
- Forstenlechner, E.; Hütte, M.; Bundi, U.; Eichenberger, E.; Peter, A.; Zobrist, J. (1997): Ökologische Aspekte der Wasserkraftnutzung im alpinen Raum. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, 100 Seiten.
- LHG (1999): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz für 1999. Herausgegeben von der Landeshydrologie und -geologie, Bern. 420 Seiten + Planbeilage.
- LHG (2000/2001): Wochenganglinien von Pegel und Abfluss der eidg. hydrometrischen Stationen. Datenlieferungen und aktuelle Darstellungen im Internet unter www.admin.ch/lhg/daten/x/hyddaten.htm.
- Limnex (2000a): Kurzbericht zum Methodenvergleich Schwalluntersuchungen zu Handen der EAWAG. 12 Seiten.
- Limnex (2000b): Auswirkungen des Schwallbetriebes des Kraftwerkes Kubel auf die Wassertiere der Sitter. Bericht im Auftrag der kantonalen Jagd- und Fischereiverwaltung St.Gallen. 32 Seiten + Beilagen.
- Marrer, H. (1995): Zusatzuntersuchungen am Inn bei Celerina im Winter 1994/95. Bericht des Büros für Gewässer- und Fischereifragen im Auftrag des EW St.Moritz und des kantonalen Amtes für Umweltschutz Graubünden. 49 Seiten + Beilagen.
- Marrer, H. (2000): Erneuerung Kraftwerk Amsteg. Gewässerökologisch verträgliche Ausgestaltung des Schwellbetriebes. Erweiterter Zwischenbericht des Büros für Gewässer- und Fischereifragen im Auftrag der SBB-Division Infrastruktur, Zollikofen. 45 Seiten + Beilagen.
- Schöb, P. (1998): Untersuchung des Fischbestandes in der vom Schwellbetrieb des Kraftwerks Kubel beeinflussten Sitter. Allgemeine Ausführungen zum Schwellbetrieb. Auszug aus einer Praktikumsarbeit an der EAWAG, 8 Seiten.
- Strahler, A.N. (1957): Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Am. Geophys. Union 38, 913 - 920.
- UVB KWB (1992): Umweltverträglichkeitsbericht zum Konzessionsprojekt 1991 „Erneuerung und Ausbau der Kraftwerke im oberen Puschlav“, Band 3, Teilbericht VI.2. Bericht im Auftrag der Kraftwerke Brusio AG, Poschiavo. 75 Seiten + Beilagen.

7. Anhang

Anhang 1:

Geografische Lage der erfassten Kraftwerks-Zentralen mit Schwallbetrieb in der Schweiz. Die Rückgabe-Zentrale Samina am Vaduzer Giessen im Fürstentum Liechtenstein (vgl. Tabelle 1 des Berichtes) ist nicht eingetragen.



Anhang 2 (Folgeseiten):

Fragebogen für die Schwall-Umfrage bei den kantonalen Wassernutzungs-Fachstellen.

DIE UMFRAGE BETRIFFT NUR SPEICHERKRAFTWERKE, DIE DURCH IHREN INTERMITTIERENDEN BETRIEB SCHWALLARTIGE ABFLUSSCHWANKUNGEN IN UNTERLIEGENDEN FLIESSGEWÄSSERN HERVORRUFEN BZW. DAZU BEITRAGEN KOENNEN. AUSGENOMMEN SIND KRAFTWERKSSTUFEN, DEREN ABTURBINIERTES WASSER DIREKT IN EINEN UNTERLIEGENDEN SEE EINGELEITET ODER BIS ZUR WEITERGABE AN DIE FOLGENDE STUFE (BZW. DAS HINAUFPUMPEN ZUR VORHERGEHENDEN STUFE) IN EINEM AUSGLEICH-S-BECKEN ZWISCHENGESPEICHERT WIRD. AUSGESCHLOSSEN SIND SCHLISSLICH REINE LAUFKRAFTWERKE, DIE ZUFLIESENDE SCHWÄLLE MEHR ODER WENIGER UNVERÄNDERT WEITERGEBEN.

Zutreffendes (O) ankreuzen. (ca.) = ungefähre Angaben.

1. Allgemeine Angaben

KANTON: Fachstelle:

Adresse:

Kontaktperson:

Tel. Nr. direkt:

Fax. Nr.:

Die gemachten Angaben sind allgemein zugänglich und uneingeschränkt verwendbar
 intern, aber uneingeschränkt verwendbar
 intern und vertraulich zu behandeln

Bei vertraulichen Angaben: Bitte Einschränkungen bei der Verwendbarkeit präzisieren:

2. Zentralen mit Schwallbetrieb

Auf Seite 2 finden Sie, nach Kantonen geordnet, eine Zusammenstellung von Kraftwerken mit grösseren Speichern oder Ausgleichsbecken. Die Angaben stammen aus der Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (BWW, Stand 1973 bzw. 1991) und aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz (LHG, Stand 1990). Nach BWW (1991) richten sich auch die Abkürzungen der jeweiligen Kraftwerke (**Gesellschaft**). Wenn ein Rückgabe-Gewässer kurz nach der Einleitung des abturbinierten Wassers in ein grösseres Gewässer einmündet, ist dies in der entsprechenden Kolonne mit einem Pfeil (->) gekennzeichnet.

Bitte überprüfen Sie die Angaben für Ihren Kanton auf ihre Richtigkeit, korrigieren Sie wo nötig und ergänzen Sie fehlende (?) oder unvollständige Angaben. In der mit **Schwall** überschriebenen Kolonne bezeichnen die grau hinterlegten Felder jeweils eine Zentrale, die aufgrund der vorliegenden Angaben für die Produktion von Spitzenenergie ausgelegt ist und daher Schwälle erzeugen **kann** (Ausnahme: Zentralen mit direkter Mündung in **Seen**). Bitte kreuzen Sie in dieser Kolonne jene Zentralen an, welche in der Regel zumindest zeitweise auch **tatsächlich** im Schwallbetrieb gefahren werden und zu entsprechenden Abflussschwankungen in den Rückabegewässern führen.

Da die Angaben auf Seite 2 nicht ganz dem neuesten Stand entsprechen und zudem kleinere Speicher- oder Ausgleichsbecken nicht berücksichtigt sind, gibt es höchstwahrscheinlich weitere, noch nicht aufgeführte Zentralen mit Schwallbetrieb. Bitte tragen Sie diese gegebenenfalls in die leere Tabelle auf Seite 3 ein. Es kann sich dabei neben Zentralen in ihrem eigenen Kanton ohne weiteres auch um Ihnen bekannte Anlagen in anderen Kantonen handeln.

Kanton	Rückgabe-Gewässer	Rückgabe-Zentrale	Gesellschaft	Speicher	Schwall	Bemerkungen
AI	Schwendibach -> Sitter	Wasserauen	EWA	Sealpsee		
BE (BE / VS)	Aare	Innetkirchen	KWO	Oberaar-, Trüben-, Gelmer-, Grimsel-, Räterichsboden-, Engstlen-, Totensee; Staubecken Mattentalp		
BE	Mühlebach -> ?	Isch	EWG	Bachsee		
BE	Wildenbach -> Simme	Klusi	SKW	Oberstockensee		
BE	Thunersee	Längmad	BKW	Oberstockensee, Spiezmoos		
BE / VS	Saane	Innergsteig	KWS	Speicher Sanetsch (Senin)		
FR / VD	La Sarine	Lessoc	EEF	Lac du Vernex, Lessoc		
FR	Lac de la Gruyère	Broc	EEF	Lac de Montsalvens		
FR	La Sarine	Hauterive	EEF	Lac de la Gruyère		
FR	La Sarine -> Lac de Schiffenen	Oelberg	EEF	Lac de Pérolles		
FR / BE	La Sarine	Schiffenen	EEF	Lac de Schiffenen		
GL	Linth	Linthal	KLL	Mutt-, Limmerensee		
GL	Sernf -> Linth	Schwanden	SN	Garichtisee		
GL	Löntsch -> Linth	Am Löntsch	NOK	Klöntaler See		
GR	Vorderrhein	Ilanz I	KWI / KVR	Lai da Curnera, Nalps, Lai da Sontga Maria		
GR	Vorderrhein	Ilanz II	KWI	Speicher Pigniu (Panix)		
GR	Hinterrhein	Rothenbrunnen (a)	KWZ	Zervreilasee		
GR / I	Albula -> Hinterrhein	Sils i.D. (a)	KHR	Lago di Lei, Sufnersee		
GR	Albula -> Hinterrhein	Sils i.D. (b)	EWZ	Lai da Marmorera, Heidsee		
GR	Hinterrhein	Rothenbrunnen (b)	EWZ	Lai da Marmorera, Heidsee		
GR	Plessur	Litzirüti	EWA	Isel		
GR	Landquart	Küblis	Rätia (BK)	Davoser See		
GR	Moesa	Soazza	OIM	Lago d'Isola		
GR	Moesa	Lostallo	ELIN SA	Darbola		
GR	Poschiavino	Robbia	Rätia (FMB)	Lago Bianco		
GR	Poschiavino -> Adda (I)	Campocologno I+II	Rätia (FMB)	Lago di Poschiavo		
GR	Maira	Castasegna	EWZ	Lago da l'Albigna		
GR	Inn	Martina	EKW	Lago di Livigno		
NE / F	Le Doubs	Le Chatelot	SFMC	Lac de Moron		
NW	Secklisbach -> Engelberger Aa	Oberrickenbach	EWN	Bannalpsee		
OW / NW	Engelberger Aa	Engelberg	KWE	Trüebsee		
OW	Aa	Unteraa	EWO	Lungerer See		
OW	Hugschwendibach -> Melchaa	Hugschwendi	EWO	Melch-, Tannensee		
SG	Alpenrhein	Sarelli	KSL	Gigerwald, Speicher		
SG	Murgbach (See bis Merlen?)	ab Ober-Murgsee	EWM / Spimag	Ober-Murgsee		
SG	Walensee	Murg II	EWM / Spimag	Ober-Murgsee		
SG / AR	Sitter	Kubel	SAK	Gübsensee		
SZ	Muota	Seeberg + Balm	EBS	Glattalpsee		
SZ	Muota	Wernisberg	EBS	Selgis		
SZ	Wägitaler Aa	Siebnen	AKW	Wägitaler See		
SZ	Zürichsee	Altendorf	EWAG	Sihlsee		
TI	Ticino	Airolo	A TEL	Lago di Lucendro, della Sella		
TI	Ticino	Stalvedro	A ET	Lago di Lucendro, della Sella		
TI	Ticino	Ritom	SBB	Lago Ritom, Cadagno		
TI	Lagasca -> Ticino	Rodi	A ET	Lago Tremorgio		
TI	Ticino	Biasca	OFIBLE	Lago di Luzzone		
TI	Lago Maggiore	Gordola	VESA	Lago di Vogorno		
TI (TI / VS)	Lago Maggiore	Verbano	OFIMA	Lago di Sambuco, Cavagnoli, Naret; Lago Sfundaui; Griessee		
UR	Oberalpsee (See bis Schöni?)	ab Oberalpsee	EWU	Oberalpsee		
UR	Reuss	Andermatt	EWU	Oberalpsee		
UR	Reuss	Amsteg	KWG / KWW	Göscheneralpsee		
UR	Reuss	Amsteg	SBB	Pfaffensprung		
VD	L'Orbe	La Dernier	CV E	Lacs de Joux et Brenet		
VD / BE	Grande Eau -> Rhone	Diablerets	SRE	Lac d'Arnon (Arnensee)		
VD	Lac Lemman	Veytaux	FMHL	Lac de l'Hongrin		
VS	Längtalwasser -> Binna	Heiligkreuz	GKW	Kummenbord		
VS	Rhone	Mörel	RHOWAG	Kummenbord		
VS	Rhone	Bisch-Biel	EM	Stausee Gibidum		
VS	Ganterbach -> Saltina	Berisal	EBG	Bortelsee		
VS	Saltina -> Rhone	Silliboden	KGWS	Bortelsee		
VS	Vispa -> Rhone	Stalden	KWM	Mattmarksee		
VS	Lonza -> Rhone	Steg	KW Loetschen	Ferden		
VS	Turtmannä -> Rhone	Unterems	ITAG	Illsee		
VS	Rhone	Chippis	ALAG / FMG	Lac de Moiry, Turtmann		
VS	Rhone	St. Leonard	ELSA	Lac de Tseuzier		
VS	Rhone	La Chandoline	EOS	Lac de Cleuson, Lac des Dix		
VS	Rhone	Riddes	FMM / G.D. SA	Lac de Cleuson, Lac des Dix, Lac de Mauvoisin		
VS	Canal d'assainissement -> Rhone	Fully	EOS	Lac de Fully		
VS	La Drance de Bagnes -> La Drance	Orsieres	FMO / FGB	Lac des Toules, de Champex		
VS	La Drance -> Rhone	Martigny-Bourg	EOS	Lac des Toules, de Champex		
VS (VS / F)	Rhone	Vernayaz	SBB / ESA	Lac du Vieux Emosson, Lac d'Emosson		
VS	La Salanfe -> Rhone	Mieville	SALANFE	Lac de Salanfe		
VS	Le Fossaux -> Rhone	Vouvry	SFMGE	Lac de Tanay		

4. Schwalldämpfende Massnahmen

Ein spezielles Gewicht liegt im vorliegenden Projekt auf der Beschreibung von bereits realisierten bzw. fest geplanten, baulichen oder betrieblichen Massnahmen zur gezielten Verminderung der Schwallauswirkungen sowie von deren Effekt auf die vom Kraftwerk abgegebene Abflussmenge und -variation (Wasserführung mit bzw. ohne Massnahme). Unter derartige Massnahmen fallen z.B.:

- Ausgleichsbecken für das abturbinierte Wasser zur Brechung der Schwallspitzen und Vergleichmässigung des Abflusses,
- Erhöhung des Mindestabflusses und/oder Reduktion des Spitzenabflusses zur Verminderung der Schwall/Sunk-Amplitude,
- Separate Ableitung des Turbinenwassers zur vollständigen Vermeidung des Schwallbetriebes,
- Langsameres oder stufenweises An- und Zurückfahren der Turbinen zur Dämpfung des Schwall/Sunk-Überganges.

Bitte tragen Sie die Ihnen bekannten, spezifisch schwallbezogenen Massnahmen in Kraftwerken Ihres Kantons (oder anderer Kantone) in die nachfolgende Tabelle ein. Geben Sie in der letzten Kolonne gegebenenfalls Drittpersonen an, die für detaillierte Auskünfte über die schwalldämpfenden Massnahmen und deren Auswirkungen kontaktiert werden können (z.B. von Amtsstellen, Kraftwerksgesellschaften, Ingenieur- oder Umweltbüros).

SCHWALLDÄMPFENDE MASSNAHMEN					
Kanton	Rückgabe-Zentrale	Gesellschaft	Art der Massnahme	In Betrieb seit	Kontaktpersonen für weitere Angaben

5. Abschliessende Angaben

Allgemeine Bemerkungen:

Ort und Datum:

Unterschrift: