

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Band: 97 (2005)
Heft: 5-6

Artikel: Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts
Autor: Meile, Tobias / Schleiss, Anton / Boillat, Jean-Louis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941746>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

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

Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts

■ Tobias Meile, Anton Schleiss, Jean-Louis Boillat

Zusammenfassung

Im Verlaufe der letzten zwei Jahrhunderte hat sich die Rhone flussaufwärts des Genfersees durch die erste und zweite Rhonekorrektur morphologisch stark verändert. Aber auch das Abflussregime im 5220 km² umfassenden Einzugsgebiet wurde durch den Bau der grossen Speicherkraftwerke beeinflusst. Insgesamt 1/5 des mittleren jährlichen Abflussvolumens von Porte du Scex kann im Sommerhalbjahr in den Stauseen zurückgehalten und für die Spitzenenergieproduktion ins Winterhalbjahr verlagert werden. Die total installierte Ausbauwassermenge der Zentralen beträgt 275 m³/s, was rund 150% des mittleren jährlichen Abflusses darstellt. Die Speicherkraftwerke turbinieren in Abhängigkeit des Spitzenenergiebedarfs, was in der Rhone insbesondere während der Wintermonate zu raschen Abflussänderungen und Schwall- und Sunkerscheinungen führt.

Im Rahmen der 3. Rhonekorrektur sollen Sicherheit, Umwelt sowie soziale und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Das ökologische Potenzial der Rhone hängt von einer guten Wasserqualität und einer vielfältigen Morphologie, aber auch von einem möglichst natürlichen Abflussregime ab. Im vorliegenden Artikel wird versucht, die Abweichung vom natürlichen Abflussregime zu quantifizieren. Dazu wurden Daten vom Beginn des 20. Jahrhunderts bis heute des durch den Speicherkraftwerkbetrieb beeinflussten Rhoneinzugsgebiets analysiert. Damit werden Grundlagen zur Beurteilung der Effizienz von allfälligen wasser- und flussbaulichen Massnahmen hinsichtlich der Reduktion von Schwall und Sunk bereitgestellt.

Résumé

Au cours des deux derniers siècles, le Rhône en amont du Léman a été soumis à deux importantes corrections entraînant des modifications morphologiques considérables. Par la construction des grandes centrales à accumulation qui rejettent les eaux turbinées dans le Rhône, le régime d'écoulement du bassin versant d'une taille de 5220 km² a également été modifié. En contrepartie, les corrections morphologiques et l'exploitation hydroélectrique de l'eau ont permis le développement de la plaine du Rhône.

Globalement, 1/5 du débit moyen annuel du Rhône à Porte du Scex peut être stocké dans les grandes retenues durant les mois d'été pour la production d'énergie électrique de pointe en hiver. Le débit équipé cumulé des différentes centrales se monte à 275 m³/s environ, ce qui correspond à 150% du débit moyen annuel. Le turbinage effectué en fonction de la demande en énergie électrique de pointe provoque des variations de débit rapides et fréquentes, génératrices de marnage, en particulier pendant les mois d'hiver.

Dans le cadre de la troisième correction du Rhône, les aspects sécuritaires, environnementaux, sociaux et économiques sont à considérer. Le potentiel écologique du Rhône dépend de la qualité de l'eau et de sa morphologie mais également d'un régime d'écoulement aussi naturel que possible. Le présent article a comme but de montrer et de quantifier la modification du régime d'écoulement actuel du Rhône en comparaison de celui existant au début du 20^e siècle. Des données couvrant cette période ont été analysées pour mettre en évidence l'influence des aménagements hydroélectriques sur la dynamique fluviale naturelle. Les données de base seront utiles pour l'évaluation de l'efficacité de futures mesures d'aménagement fluvial ou hydraulique destinées à réduire les variations d'écoulement rapides et fréquentes.

Summary

The Upper Rhone River morphology has been modified after 1860 by two river training works. They allowed the demographic and economic development of the Rhone-valley. In addition to these works, the flow regime in the catchment area of 5220 km² was affected by the construction of several important high-head power schemes with large reservoirs. Most of these power schemes have been built between 1950 and 1980.

Nowadays, 1/5 of the mean annual flow of «Porte du Scex» can be retained during the summer months and be used in the winter for electricity production during peak demand. The total equipped discharge of all power stations is about 275 m³/s, which represents approximately 150% of the middle annual discharge at «Porte du Scex». The water turbined according to the peak energy demand leads to rapid and frequent variations of the flow levels and velocities in the Rhone River downstream of the power houses (hydropeaking). Hydropeaking is particularly significant during the winter months and can harm aquatic life conditions together with the effect of river canalization and bad water quality.

Within the ongoing third Rhone-river training works, security as well as aspects of environment and socio-economy have to be taken into account. The ecological potential of the Rhone depends on water quality, various morphology and a flow regime which is as natural as possible. The present article shows the main results of a study on the evolution of the flow regime of the Upper Rhone River. Flow data have been analyzed from the beginning of the twentieth century until today. The results can be used to quantify the efficiency of possible future measures with the aim to reduce hydropeaking.

1. Einleitung

«...ohne Rhone gäbe es kein Tal, kein Wallis. ... Die Rhone ist ein Erbe, sie ist ein Erbe der Natur, von der wir sie ungezähmt – und oft unbändig – erhalten haben. Sie ist aber auch das Erbe zahlreicher Generationen, die alles unternommen haben, um sie zu bezähmen

und den enormen Aufschwung der Ebene zu ermöglichen.» Das vorliegende Zitat von Staatsrat Rey-Bellet (DSFB, 2000) deutet auf die Entwicklung der Morphologie (Zähmung), aber auch der Hydrologie der Rhone sowie auf jene der Talebene (Aufschwung) hin. Morphologisch hat die Rhone mit der 1. und 2.

Rhonekorrektur zwei massgebende Veränderungen erfahren. Hydrologisch war die Rhone bis zum Beginn des Baus der grossen Speicherkraftwerke ab den 1950er-Jahren wenig beeinflusst (Bild 1). Die morphologischen und hydrologischen Veränderungen, welche die bedeutende landwirtschaftliche,



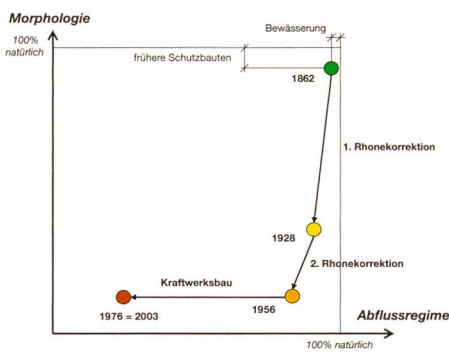


Bild 1. Schematische Darstellung der morphologischen und hydrologischen Entwicklung der Rhone.

industrielle und soziale Entwicklung der Talebene ermöglicht haben, führten gleichzeitig aber auch zu einer Verarmung der benthischen und terrestrischen Fauna und Flora im und entlang dem Gewässer.

Vor dem Jahre 1860 schützten sich die Walliser vor der Bedrohung durch die Rhonehochwasser mit Massnahmen, die meist isoliert, unkoordiniert und zum Teil offensiv¹ waren (SFRD, 1964). Dies führte immer wieder zu Überschwemmungen und zu Konflikten zwischen Bewohnern der linken und rechten Talseite. Die Arbeiten der 1. Rhonekorrektur erfolgten von 1863 bis 1894, im Anschluss an die grossen Hochwasser im Jahre 1860. Nach einer Phase von Ergänzungsarbeiten begann 1930 die 2. Rhonekorrektur und dauerte bis 1960. Durch die Rhonehochwasser der Jahre 1987, 1993 und 2000 wurde die Notwendigkeit von neuen respektive ergänzenden Massnahmen zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit (begrenzte Abflusskapazität, Dammbuchrisiko) und Werterhaltung (grosses Schadenspotenzial) verdeutlicht (DSFB, 2000 und BWG, 2002).

Das Wasser im Einzugsgebiet der Rhone wird hauptsächlich für die Bewässerung und die Elektrizitätsproduktion genutzt. Die Wassernutzung zur Elektrizitätserzeugung begann in den frühen Jahren des 20. Jahrhunderts und hat entscheidend zur Entwicklung der Rhoneebene beigetragen. Vor dem Bau der Kraftwerke, wie auch heute noch, wurde vor allem das Wasser der Seitenbäche zur Bewässerung der landwirtschaftlich genutzten Flächen verwendet. Während der Einfluss der Bewässerung in den Sommermonaten hydrologisch als weitgehend unbedeutend bezeichnet werden kann, haben die Speicherkraftwerke einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussregime der Rhone und ihre Seitenbäche. Auf die Be-

¹ Unter offensiven Hochwasserschutzmassnahmen versteht man Bauwerke, die das Wasser ans gegenüberliegende Ufer ablenken.

einflussung der Abflüsse der Seitenbäche (Restwasserstrecken, Spülungen) wird in diesem Beitrag nicht näher eingegangen. Wie stark diese beeinflusst sind, kann der Tafel 5.2 des Hydrologischen Atlas der Schweiz aufgrund des verbleibenden Anteils des mittleren natürlichen Jahresabflusses entnommen werden. Der hydrologische Atlas zeigt ebenfalls, welche Seitengewässer hydrologisch noch unbeeinflusst sind. Es sind dies einerseits verschiedene Seitenbäche im Goms, andererseits auf der rechten Talseite zwischen Brig und Siders der Kelchbach, Mundbach, Baltschiederbach, Bietschbach, Jolibach, die Tschingel, Feschilju, Raspille, Sinièse und schliesslich flussabwärts von Siders die Rèche, Sionne, Losentse, Saletense, der Torrent de St-Barthélemy und die Mauvoisin.

Der Einfluss der Kraftwerke beschränkt sich nicht nur auf das Abflussregime der Rhone und der Seitengewässer. Veränderungen zeigen sich auch bei der Wassertemperatur (Meier et al., 2004), dem Schwebstofftransport (Loizeau & Dominik, 2000; Portmann et al., 2004), beim Kolmationsverhalten der Dämme und der Gewässersohle (Schälchli, 1993) sowie beim Grundwasserspiegel (Fette et al., 2004) und dem Sauerstoffhaushalt des Genfersees (Loizeau & Dominik, 2000). Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf die Veränderung des Abflussregimes des Rhonehauptflusses, welche eine Folge der teilweisen Verschiebung der Abflüsse in die Wintermonate und des Schwall-/Sunkbetriebes der Speicherkraftwerke ist.

2. Kraftwerksbau im Rhoneinzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der Rhone mit den Gewässern, den Stauseen und den Speicherkraftwerken ist in Bild 5 dargestellt. Der Kraftwerksbau (Bild 2) an der Rhone begann im Jahre 1902 mit der Zentrale in Vouvy, welche das Wasser des Lac de Tanay turbinert. Bis 1950 blieb die Wassernutzung zur Elektrizitätsproduktion allerdings bescheiden. Von 1950 bis 1975 wurden die meisten der heutigen, leistungsstarken Zentralen realisiert und in Betrieb genommen. Nach 1975 erfolgten noch der Bau der Zentrale Steg, die Anpassung der Zentrale Bitsch sowie der Bau der Zentrale Bieudron des Kraftwerks Cleuson-Dixence, welche von 1998 bis zum 12. Dezember 2000 in Betrieb war. Zu Bild 2 gilt anzufragen, dass die Zentralen Bitsch (55 m³/s), Ackersand 2 (14 m³/s) und Steg (20 m³/s) relativ wenig Winterenergie erzeugen und dadurch für den anthropogenen Winterschwall in der Rhone von untergeordneter Bedeutung sind. Die Zentralen Fully, Vouvy, Miéville,

Chandoline und Chippis «Navisence» fallen infolge der geringen Ausbauwassermengen ebenfalls weniger ins Gewicht. Die aufsummierte, für die Schwallerzeugung massgebende Ausbauwassermenge liegt heute in Porte du Scex je nach Auslegung (mit oder ohne die kleineren Zentralen; mit oder ohne Bitsch, Ackersand 2 und Steg) zwischen 160 und 275 m³/s. Der mittlere Jahresabfluss an der Messstation Porte du Scex für die Periode 1905–2003 liegt mit 181 m³/s somit in derselben Grössenordnung wie die total installierte Ausbauwassermenge. Diese entspricht zudem in etwa dem dreifachen natürlichen Abfluss der Rhone in Porte du Scex während der Wintermonate Oktober bis April der Jahre 1905 bis 1927 (69,5 m³/s).

Das summierte Nutzvolumen der Stauseen (Bild 3) hat sich parallel zur Ausbauwassermenge entwickelt. Bis 1950 bleibt das in den Stauseen zurückgehaltene und in den Wintermonaten turbinierte Wasservolumen mit rund 97 Mio. m³ gering. Zwischen 1950 und 1975 erfolgte die Fertigstellung sämtlicher grosser Speicherseen, was zu einem totalen Nutzvolumen von 1157 Mio. m³ führte, welches im Jahre 1991 durch die Erhöhung des Speichers Mauvoisin auf 1195 Mio. m³ gesteigert wurde. Das Volumen von 1195 Mio. m³ entspricht 21% der totalen jährlichen Abflussmenge bei Porte du Scex.

In Bild 4 ist die heute installierte Ausbauwassermenge der Speicherkraftwerke im Verhältnis zur total installierten Ausbauwassermenge entlang der Rhone dargestellt. Diese «relative Ausbauwassermenge» darf als einfacher Indikator der Schwallbeeinflussung der Rhone in ihrem Längsverlauf erachtet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass der intermittierende Betrieb der verschiedenen Zentralen die resultierenden Schwall- und Sunkraten (dQ/dt) der Rhone vergrössern oder verringern kann. Zudem produzieren, wie gesagt, nicht alle Kraftwerke gleich viel Winterenergie und wirken somit nur bedingt schwallerzeugend. Zudem ist entscheidend, in welchen Tageszyklen turbiniert wird.

Die insgesamt installierte Ausbauwassermenge der Speicherkraftwerke von 186 m³/s und das totale Nutzvolumen der Stauseen von rund 1200 Mio. m³ können das Abflussregime der Rhone in bedeutendem Masse verändern (Kapitel 4). Die Kraftwerke und Speicherseen beeinflussen zudem andere Faktoren, wovon die wichtigsten in Tabelle 1 ersichtlich sind.

3. Ausgewertete Daten und untersuchte Grössen

Zur Untersuchung der Veränderung des Abflussregimes der Rhone wurden sowohl ana-

loge (historische Limnigraphenaufzeichnungen) als auch digitale Grundlagen verwendet. Es handelt sich dabei primär um Daten der Abflussmessstationen in Sion, Branson und Porte du Scex des Bundesamtes für Wasser und Geologie. Weitere historische Abflussinformationen wurden aus Supan (1895) und Utrecht (1906) entnommen.

Mit Hilfe der Limnigraphenaufzeichnungen und der Pegel-Abfluss-Beziehung in Porte du Scex konnten die Tagesganglinien des Jahres 1907 mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde rekonstruiert werden. Das Jahr 1907 dient als unbeeinflusstes Referenzgewässer für die Analyse der Tagesganglinien sowie der Schwall- und Sunkraten. Es handelt sich bezüglich Jahresmittel und Monatsmittel um ein durchschnittliches Jahr und kann als repräsentativ erachtet werden. Die Schwall- und Sunkraten des Jahres 1907 müssten korrekterweise als natürliche Anstiegs- und Rückgangsraten bezeichnet werden. Der Einfachheit halber werden in diesem Bericht aber auch für 1907 die Bezeichnungen Schwallraten und Sunkraten verwendet.

Die ausgewerteten Daten untersuchter Grössen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die monatlichen Pardéoeffizienten sind definiert als der mittlere Monatsabfluss über dem mittleren Jahresabfluss gemäss der Formel:

$$PK_{ma} = \frac{Q_{\text{moy mensuel } ma}}{Q_{\text{moy annuel } a}} \quad \text{mit } 1 \leq m \leq 12 \text{ und } 1905 \leq a \leq 2003.$$

Für die verschiedenen Analysen wurde jeweils zwischen den Perioden 1905–1950 (vor Speicher- und Kraftwerksbau), 1951–1975 (während des Ausbaus der Speicher und Kraftwerke) und 1976–2003 (nach Speicher- und Kraftwerksbau) unterschieden (Bilder 2 und 3).

4. Resultate

4.1 Jahresabflüsse

Bild 6 zeigt die mittleren Jahresabflüsse zwischen 1905 und 2003. Das natürliche Einzugsgebiet (topografisch und geologisch bedingt) und das effektive Einzugsgebiet (durch Zu- und Ableitungen beeinflusst) unterscheiden sich für diesen Zeitraum praktisch nicht. Lediglich 0,08 m³/s (seit 1949, Totensee) und 1,2 m³/s (ab 1966, Griessee) werden dem Einzugsgebiet der Rhone entzogen. Seit 1973 wird dem Emosson-Stausee 2,6 m³/s aus Frankreich zugeleitet. Die Kraftwerke und Speicherseen haben demzufolge auf die mittleren Jahresabflüsse keinen wesentlichen Einfluss.

Die mittleren Jahresabflüsse weisen gemäss dem Mann-Kendall- sowie dem

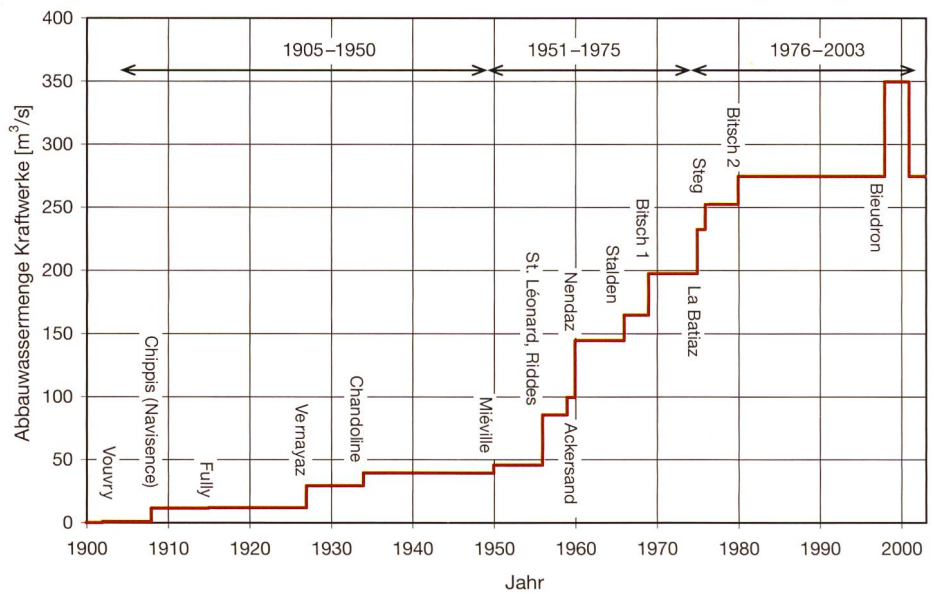


Bild 2. Entwicklung der Abwasseremenge der Speicherkraftwerke (siehe auch Bild 5). Daten: Service des forces hydrauliques (<http://www.vs.ch/>).

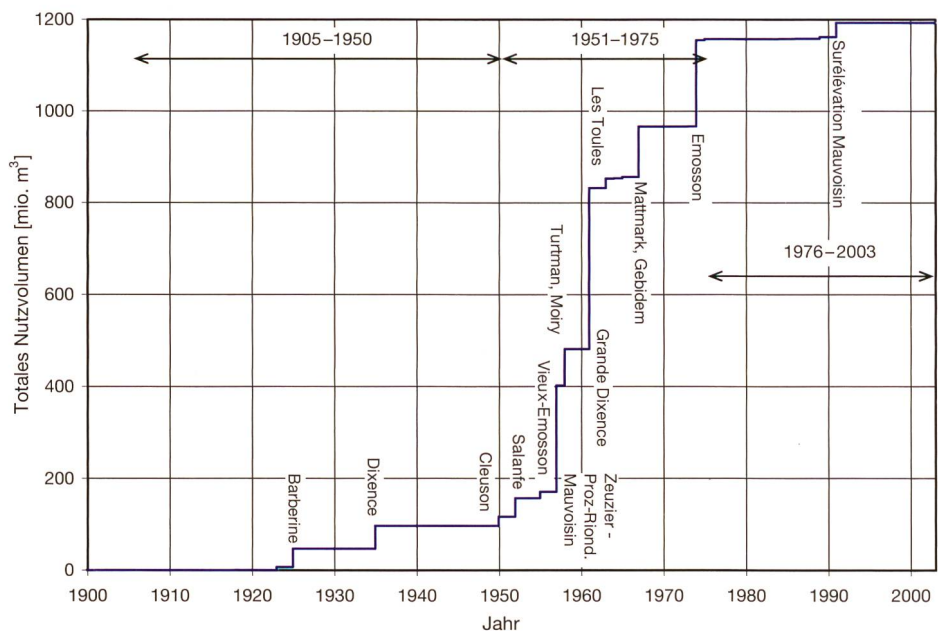


Bild 3. Entwicklung der Speicherkapazität der Stauseen (siehe auch Bild 5). Daten: Schweizerisches Talsperrenkomitee (<http://www.swissdams.ch/>).

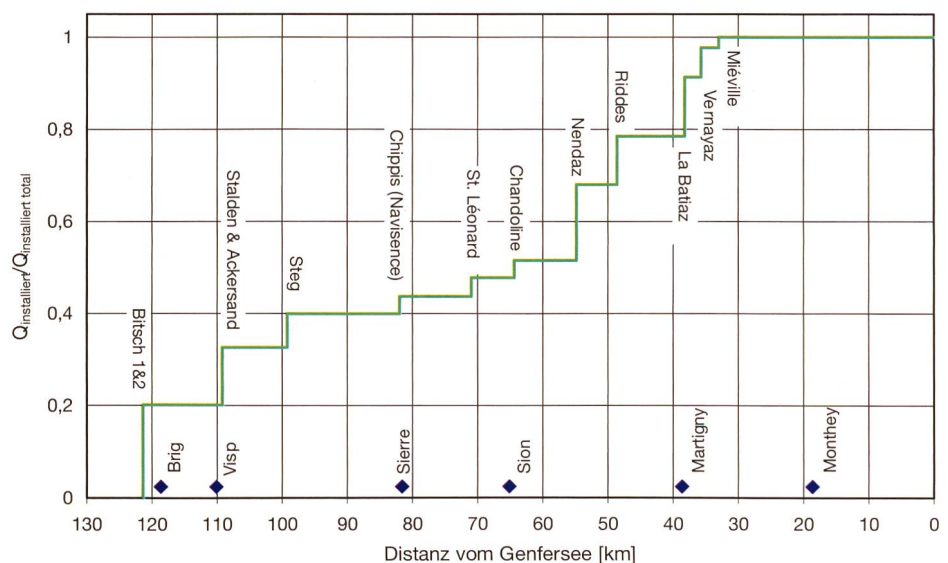


Bild 4. Zunahme der «relativen Abwasseremenge» entlang der Rhone (einfacher Schwallindikator).

Nutzvolumen der Speicherseen (1195 Mio. m ³ /s = 21% der mittleren, jährlichen Wasserfracht von Porte du Scex der Jahre 1905–2003)	Ausbauwassermenge der Zentralen* (186 m ³ /s = ca. 2,5fache mittlere, jährliche Abflussmenge der Wintermonate in Porte du Scex der Jahre 1905–1927)
<ul style="list-style-type: none"> • Verschiebung der mittleren Monatsabflüsse • Erhöhung/Verminderung der mittleren Tagesabflüsse • Verminderung der jährlichen Hochwasserspitzen • Reduktion der grossen Hochwasser (Raboud et al., 2002) • Verminderung der Schwebstoffmenge (Loizeau & Dominik, 2000), Rückhalt durch Stauseeverlandung (Boillat et al., 2003; Schleiss & Oehy, 2002) • Einfluss auf die mittleren Jahres- und Monatstemperaturen des Wassers 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss auf die Tagesganglinien des Abflusses und die davon abhängigen Parameter (Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegel, ...) • Zunahme der Schwall- und Sunkraten (dQ/dt) • Einfluss auf den Tageszyklus der Wassertemperatur (Meier et al., 2004) • Einfluss auf den Tageszyklus der Schwebstoffkonzentration/Trübung (Portmann et al., 2004) und die Kolmation der Sohle
* Die Abbauwassermenge von 186 m ³ /s wird als massgebend für den Winterschwallbetrieb angenommen. Dabei werden als erste Annäherung die Zentralen Bitsch, Ackersand 2 und Steg mit geringer Winterproduktion vernachlässigt.	

Tabelle 1. Einflüsse des Nutzvolumens der Speicherseen und der Ausbauwassermenge der Zentralen auf verschiedene Parameter der Rhone.

Daten	Bezeichnung	Messstation; Messperiode
Mittlere Tagesabflüsse	Q_{moyj}	Porte du Scex; 1905 bis 2003
Tagesganglinien	Q_i	Sion, Branson, Porte du Scex; 1998 bis 2003
Jährliche Hochwasserspitzen	$Q_{max\ annual}$	Porte du Scex; 1905 bis 2003
Limnigraphenaufzeichnungen	h_i	Porte du Scex; 1907
Pegel-Abfluss-Beziehung	H-Q	Porte du Scex (gültig für 1907)

Untersuchte Grösse	Zeitraum	Messstation	Bezeichnung	Ausgangsdaten
Mittlerer Jahresabfluss	1905–2003	Porte du Scex	$Q_{moy\ annual}$	Mittlere Tagesabflüsse
Mittlere Monatsabflüsse	1905–2003	Porte du Scex	$Q_{moy\ mensuel}$	Mittlere Tagesabflüsse
Pardékoefizienten	1905–2003	Porte du Scex	$PK_{mensuel}$	$Q_{moy\ mensuel}, Q_{moy\ annual}$
Dauerlinie der Tagesmittel	1905–2003	Porte du Scex	–	Mittlere Tagesabflüsse
Tagesganglinie	1907, 2003	Porte du Scex	Q_i	Limnigraphenaufzeichnungen und aktuelle Messwerte
Historische Schwall- und Sunkraten (dQ/dt)	1907	Porte du Scex	dQ/dt	Limnigraphenaufzeichnungen h_i und Pegel-Abfluss-Beziehung H-Q
Aktuelle Schwall- und Sunkraten (dQ/dt)	1998–2003	Sion Branson Porte du Scex	dQ/dt	Q_i (zeitliche Auflösung gemäss Daten BWG*)

* Die Zeitintervalle der Abflussmessungen des BWG sind unregelmässig und die Anzahl Messwerte pro Jahr ist nicht konstant. Um dieser Unregelmässigkeit gerecht zu werden, wurden die Schwall- und Sunkraten mit dem für die Berechnung massgebenden Zeitintervall gewichtet (1h für 1907 respektive dt(cst. für 1998–2003). Für den Vergleich der Jahre untereinander wurden die «Schwall-/Sunkraten-Verteilungskurven» normalisiert (Beobachtungswahrscheinlichkeit, siehe Kapitel 4).

Tabelle 2. Untersuchte Grössen, Zeiträume, Messstationen und Ausgangsdaten.

Spearman's-Rho-Test für ein Signifikanzniveau $\alpha=10\%$ einen signifikant zunehmenden Trend auf (siehe Kundzewicz & Robson, 2000, für die Methoden). Die Zunahme der mittleren Jahresabflüsse ist auf eine Kombination der Veränderungen von Niederschlägen, Temperatur², Verdunstung und der Gletschervolumen zurückzuführen (Schädler, 1985; Maisch et al., 2004).

4.2 Pardékoefizienten

Das Jahresabflussregime eines Gewässers kann durch die Pardékoefizienten charakte-

² Die mittlere Jahrestemperatur in Sion der Periode 1865 bis 2000 weist ebenfalls einen signifikant zunehmenden Trend auf (Signifikanzniveau $\alpha=1\%$).

riert werden, welche implizit auch die Information des Monatsmittels enthalten. Die jährlichen und über die drei Perioden gemittelten Pardékoefizienten in Porte du Scex zeigen eine deutliche Veränderung des Abflussregimes, auch wenn eine natürliche Streuung für die drei untersuchten Perioden vorhanden ist (Bild 7). Vergleicht man die gemittelten Pardékoefizienten mit jenen von natürlichen Einzugsgebieten (Weingartner & Aschwanden, 1992), kann festgehalten werden, dass das Abflussregime der Rhone in Porte du Scex früher vom Typ «Glacio-nival (b)» bis «Nivo-glaciaire» war. Heute ist das Abflussregime am selben Ort vom Typ «Nival de transition» bis «Nivo-pluvial préalpin». Die Monate Oktober bis April weisen höhere und die Monate Juni bis September tiefere Monatsmittel als

vor dem Bau der Kraftwerke auf. Das Monatsmittel im Mai ist unverändert. Die Verschiebung ist hauptsächlich auf die Speicherung des Wassers in den Sommer- und die Nutzung in den Wintermonaten zurückzuführen. Ein Teil der Verschiebung ist aber auch klimatischen Faktoren zuzuordnen. Birsan et al. (2004) zeigen, dass insbesondere in Einzugsgebieten mit einer Vergletscherung grösser als 5% die positiven Trends der Winter- und Frühlingsabflüsse signifikant sind, allerdings bei gleichbleibenden Sommer- und Herbstabflüssen.

Tabelle 3 fasst die gemittelten Pardékoefizienten für die drei Perioden sowie die prozentuale Veränderung zwischen Periode 1 und Periode 3 zusammen. Die Monatsmittel im Winter haben demzufolge rund 20 bis 150% zugenommen, die Monatsmittel im Sommer etwa 15 bis 30% abgenommen.

4.3 Tagesmittel

Die Pardékoefizienten (Kapitel 4.2) haben die Zunahme der Winter- und die Abnahme der Sommerabflüsse im Einzugsgebiet der Rhone bis Porte du Scex aufgezeigt. Dies widerspiegelt sich logischerweise auch in den Tagesmitteln (Bild 8, siehe auch Loizeau & Dominik [2000]). Der Vergleich der Tagesmittel der Periode von 1905 bis 1950 (vor Ausbau der Speicherkraftwerke) mit der Periode von 1976 bis 2003 bringt für Porte du Scex folgende Erkenntnisse:

- 1) Die Tagesmittel sind heute während eines Drittels des Jahres (117 Tage) kleiner und während zwei Dritteln des Jahres (247 Tage) grösser als vor dem Ausbau der Speicherkraftwerke.
- 2) Während 80 Tagen pro Jahr beträgt die Zunahme mehr als 100% gegenüber der Periode von 1905 bis 1950.
- 3) Während 30 Tagen pro Jahr beträgt die Abnahme der Tagesmittel im Sommer im Vergleich zur Periode von 1905 bis 1950 mehr als 100 m³/s. Im Maximum hat das Tagesmittel um rund 150 m³/s (ΔQ_3) abgenommen. Die Abnahme des jährlichen Höchstabflusses Q_1 beträgt im Mittel immerhin noch rund 120 m³/s, obwohl die drei grossen Hochwasser der Jahre 1987, 1993 und 2000 in die Periode von 1976 bis 2003 fallen.
- 4) Die prozentuale Reduktion an 117 Tagen vor allem während der Sommermonate (0% bis 24%) ist wesentlich geringer als die prozentuale Zunahme an den übrigen 247 Tagen (0% bis 113%). Gewässerökologisch und hydraulisch stellt eine Zunahme von 100% auf tiefem Abflussniveau im Winterhalbjahr einen wesentlich grösseren Einfluss dar als eine 20%ige Abnahme auf hohem Abflussniveau im

Sommerhalbjahr, da sich die hydraulischen Parameter bei relativ tiefem Abflussniveau verhältnismässig schneller ändern. Die Gewässermorphologie, das heisst in erster Linie die Uferneigung, ist aber in den Überlegungen mitzubersichtigenden.

- 5) Die Differenz des Volumens der erhöhten Abflüsse an 247 Tagen (1046 Mio. m³) und des Volumens der verminderten Abflüsse während 117 Tagen (688 Mio. m³) beträgt 358 Mio. m³ (11,35 m³/s). Dieser Unterschied entspricht der Zunahme der gemittelten Jahresabflüsse der Perioden 1905–1950 (179,46 m³/s) und 1976–2003 (190,81 m³/s).

Aus der grafischen Analyse der Tagesmittel geht zusätzlich hervor, dass gemäss der Elektrizitätsnachfrage während der Wintermonate ein Wochenzyklus der Tagesmittel entsteht (Bild 9, links). Für die Sommermonate ist dies nicht mehr der Fall (Bild 9, rechts), da die Elektrizitätsnachfrage kleiner ist und die Stauseen für die Spitzenenergieproduktion im Winter gefüllt werden. Zudem sind die allenfalls turbinierten Wassermengen im Vergleich zum Schnee- und Gletscherschmelzabfluss der nicht gefassten Einzugsgebiete klein.

4.4 Wochen- und Tagesganglinien

Die Abflussganglinien sowie die Schwall- und Sunkraten von vier charakteristischen Wochen für die Jahre 1907 und 2003 wurden miteinander verglichen (Bilder 10 und 11) wobei Folgendes zu beachten ist:

- 1) In die Aprilwoche 2003 fielen die Osterfeiertage, deswegen sind vom Karfreitag bis Ostermontag die Schwall- und Sunkraten und der Abfluss relativ gering. Die Aprilwoche 1907 war eine Niederwasserwoche mit wenig Abfluss und praktisch keinen Abflussschwankungen.
- 2) Die Maiwoche 1907 entsprach einer typischen Schneeschmelzwoche mit stets

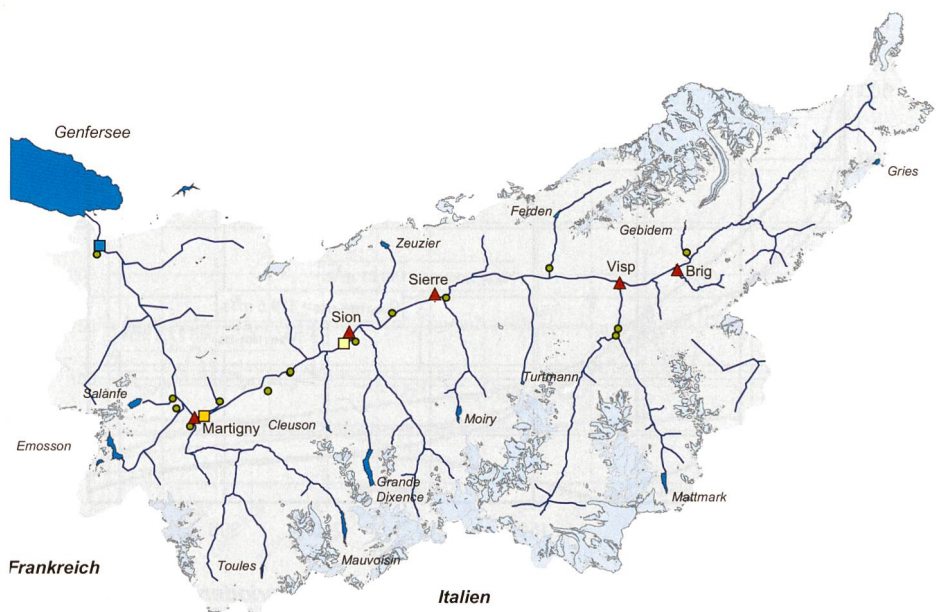


Bild 5. Übersicht des Rhoneeinzugsgebiets mit Gletschern (hellblau), Seen und Fließgewässern (blau), Städten (rote Dreiecke) und Kraftwerkszentralen (grüne Kreise) von der Quelle bis zur Mündung: Bitsch, Stalden & Ackersand 2, Steg, Chippis (Navisence), St. Léonard, Chandoline, Nendaz & Bieudron, Riddes, Fully, La Batiaz, Vernayaz, Miéville und Vouvy. Messstationen BWG (Quadrate): Sion (gelb), Branson (orange), Porte du Scex (blau).

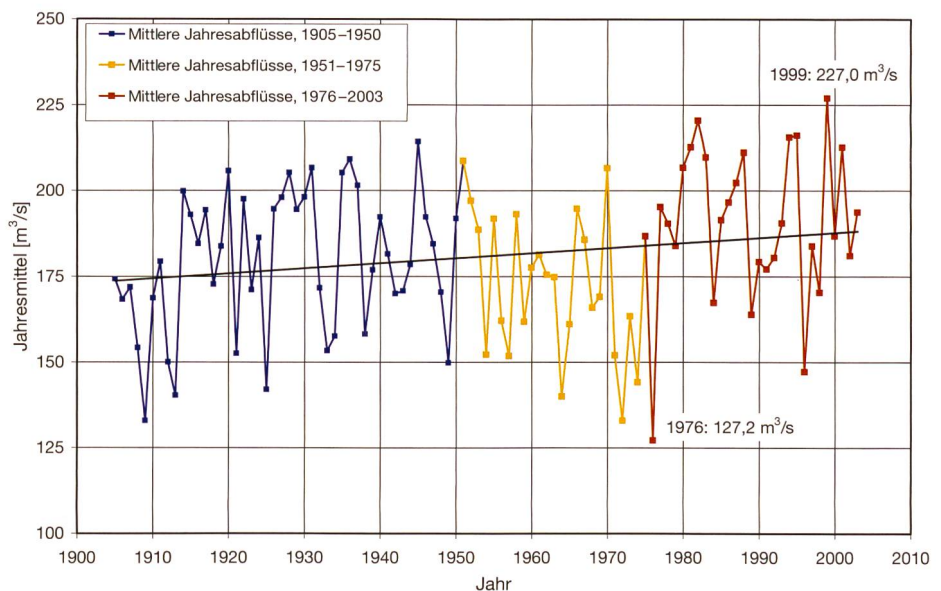


Bild 6. Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse in Porte du Scex.

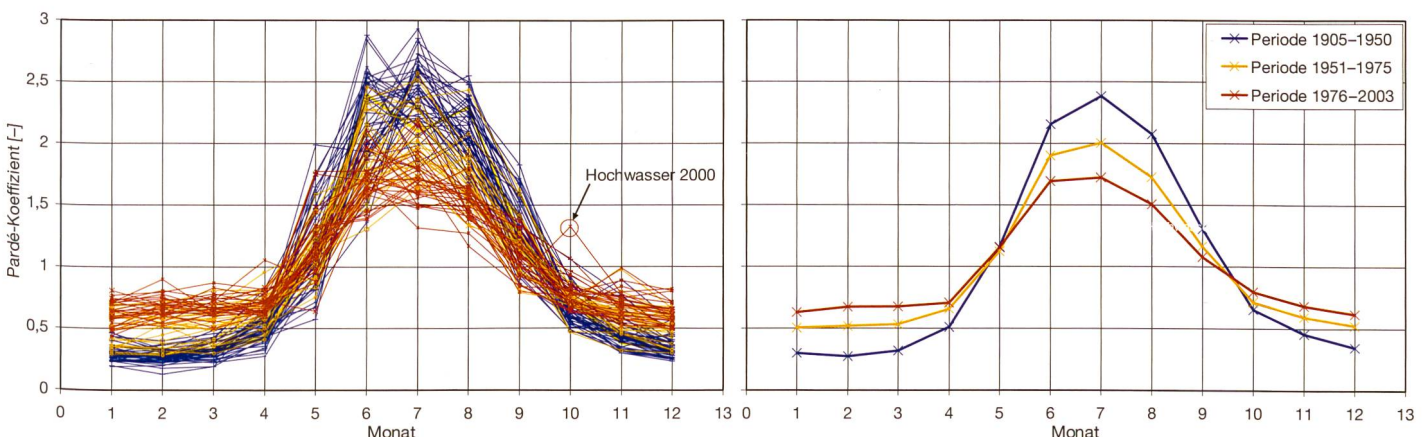


Bild 7. Links: Jährliche Pardé-Koeffizienten in Porte du Scex; blaue Linien: 1905–1950 (vor Ausbau der Kraftwerke); orange Linien: 1951–1975; rote Linien: 1976–2003. Rechts: Gemittelte Pardé-Koeffizienten in Porte du Scex.

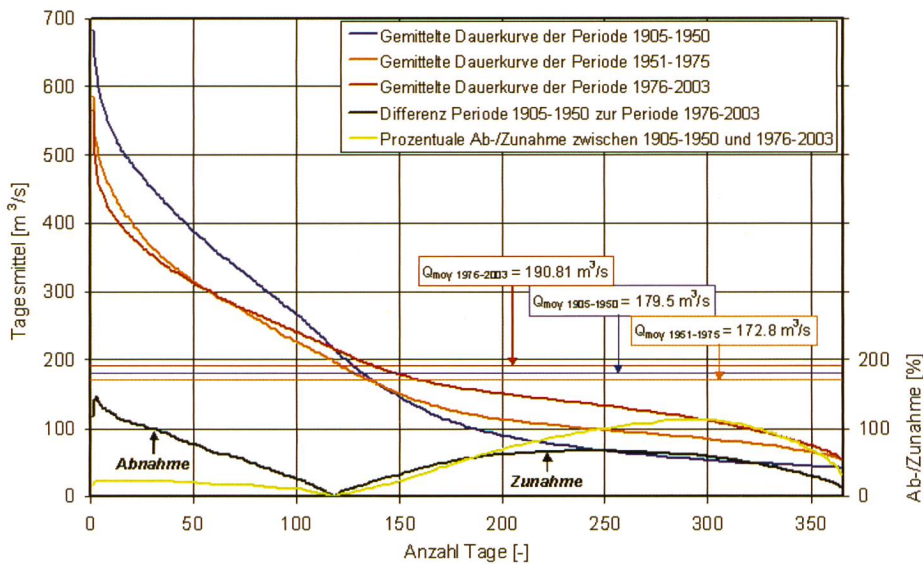


Bild 8. Dauerkurven der Tagesmittel in Porte du Scex für die Perioden 1905–1950, 1951–1975 und 1976–2003. Absolute und prozentuale Abweichung der Dauerkurve der Periode 1976–2003 von der Dauerkurve der Periode 1905–1950.

ansteigendem Abfluss, aber ohne Tageszyklen. Dieser resultiert aus der zunehmenden Sättigung der Schneedecke. Dieselbe Woche im Jahr 2003 ist eine typische durch den Turbinenbetrieb beeinflusste Woche mit mehreren resultierenden Abflussspitzen.

3) In der Augustwoche 1907 mit hohen Temperaturen fand ein Sommerhochwasser statt, und es sind temperatur- und sonneneinstrahlungsbedingte Schnee- und Gletscherschmelz-Tageszyklen³ sowohl im Abfluss als interessanterweise auch in den natürlichen Schwall- und Sunkraten klar erkennbar. Ein Tageszyklus des Abflusses ist auch für das Jahr 2003 fest-

stellbar. Dieser ist von der Schnee- und Gletscherschmelze der nicht genutzten Einzugsgebiete sowie der beschränkten Kapazität der bestehenden Wasserfassungen abhängig.

4) Die Oktoberwoche des Jahres 1907 wies ein kleines Herbsthochwasser auf. Im Jahre 2003 handelte es sich um eine typische Turbinierwoche. Betreffend der Schwall- und Sunkraten zeigt sich, dass während des Anstiegs des Hochwassers 1907 kurzzeitig ähnliche hohe Schwallraten erreicht werden wie im Jahre 2003 während aller Wochentage mehrmals.

Bilder 10 und 11 zeigen lediglich die Abflussganglinien und Schwall- und Sunkra-

ten von vier charakteristischen Wochen. Das Resultat des Vergleichs der Ganglinien 1907 und 2003 über das ganze Jahr ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Bezüglich Schwall- und Sunkraten kann grundsätzlich festgehalten werden, dass die maximalen absoluten Schwall- und Sunkraten während der Monate Juni, Juli, August und September für 1907 und 2003 vergleichbar sind. In den übrigen Monaten sind die maximalen absoluten Schwall- und Sunkraten 1907 wesentlich kleiner als 2003. Dem Gewässer fehlt demzufolge in diesen Monaten gegenüber dem naturnahen Referenzzustand eine Ruhephase. Die Frequenz der Schwall- und Sunkraten (Anzahl von Abflusszunahmen und -abnahmen pro Tag) ist jedoch über das ganze Jahr 2003 deutlich höher als 1907.

³ Der Zeitpunkt der Tagesspitze in Porte du Scex für Schönwettertage im August des Jahres 1907 war 3 bis 4 Uhr morgens. Heute trifft das Maximum bei charakteristischem Turbinierbetrieb jeweils etwa um 18 Uhr abends in Porte du Scex ein. Die Auswertung der Limnigraphenaufzeichnungen hat ergeben, dass die Tagesspitze im Jahre 1907 für Perioden mit einem Tageszyklus in Sion zwischen 21 Uhr abends (August) und 4 Uhr morgens (Mai) und in Porte du Scex zwischen 3.30 Uhr morgens (August) und 8.30 Uhr morgens (Mai) eintraf. Je mehr es sich um Gletscher- anstelle von Schneeschmelzwasser handelt, desto früher treffen die täglichen Abflussspitzen in Sion respektive Porte du Scex ein, da die Reaktionszeit der Gletscher im Jahresverlauf abnimmt.

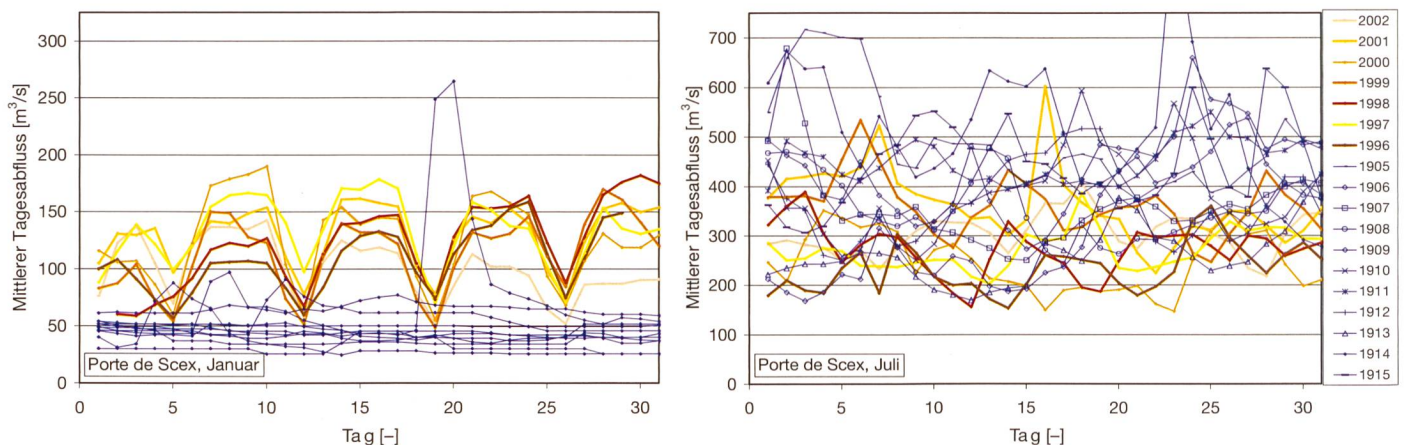


Bild 9. Links: Erkennbarer Wochenzyklus der Tagesmittel in Porte du Scex im Januar der Jahre 1996–2003. Tag 5 entspricht jeweils einem Sonntag. Rechts: Tagesmittel in Porte du Scex im Juli (kein identifizierbarer Wochenzyklus).

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
1905–1950 (1)	0,30	0,27	0,32	0,51	1,16	2,16	2,38	2,08	1,30	0,66	0,46	0,35
1951–1975 (2)	0,50	0,52	0,53	0,66	1,12	1,90	2,00	1,73	1,17	0,71	0,59	0,52
1976–2003 (3)	0,63	0,68	0,68	0,71	1,16	1,69	1,72	1,51	1,08	0,80	0,69	0,62
Veränderung (1→3) [%]	111	147	111	39	0	-21	-28	-27	-17	21	50	77

Tabelle 3. Pardéoeffizienten und prozentuale Veränderung zwischen der Periode 1905–1950 und der Periode 1976–2003.

4.5 Statistische Analysen der Schwall- und Sunkraten

Um ein ganzheitliches Bild zu erhalten, wurden die Schwall- und Sunkraten statistisch über das ganze Jahr (Bild 12) oder aufgeteilt auf die einzelnen Monate (Bild 13) ausgewertet (Histogramme, Erwartungswerte, Standardabweichungen). Um die einzelnen Jahre miteinander vergleichen zu können, wurden die Schwall- und Sunkraten mit den massgebenden Beobachtungsdauern gewichtet und die erhaltenen Histogramme normalisiert. Die Fläche unter den in den Bildern 12 und 14 dargestellten Verteilungen beträgt jeweils 1, die y-Achsen entsprechen somit Beobachtungswahrscheinlichkeiten der zugehörigen Schwall- und Sunkraten. Je mehr eine Kurve zugespitzt ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Abfluss pro Zeit nicht oder nur sehr wenig ändert. Je flacher eine Kurve ist, umso mehr nehmen Frequenz und Amplitude der grossen Schwall- und Sunkraten zu.

Bild 12, links, zeigt deutlich, wie in Porte du Scex die grossen jährlichen Schwall- und Sunkraten nach dem Bau der Speicherkraftwerke zugenommen haben. Diese Zunahme ist praktisch ausschliesslich dem Kraftwerksbetrieb zuzuordnen. Für 1998 bis 2003 sind kaum Unterschiede zu erkennen. Für die Jahre 1907 und 1999 (vor und nach dem Bau der Speicherkraftwerke) wurden die Schwall- und Sunkraten an verschiedenen Orten verglichen (Bild 12, rechts: Sion 1999, Branson 1999, Porte du Scex 1907 und 1999). Daraus ist ersichtlich, dass der Schwalleinfluss flussabwärts zunimmt. Die Standardabweichung der Schwall- und Sunkraten in Sion, Branson und Porte du Scex stimmt mit der Zunahme der Wasserrückgaben der Zentralen entlang der Rhone gut überein (Bild 4).

Bild 13 zeigt die relative Anzahl Beobachtungen innerhalb bestimmter Schwall- und Sunkraten (Unterschreitungswahrscheinlichkeit). Vergleicht man 1907 mit 1998–2003 in Porte du Scex, so waren 1907 beispielsweise 90,7% der beobachteten Raten kleiner als $\pm 0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$; für 1998–2003 sind es lediglich noch 44,5%. Für $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ betragen die entsprechenden Werte 99,7% und 83,4%. Aus benthischer Sicht sind gemäss Brooker (1981) und Hamilton (1976) Schwall- und Sunkraten von $dQ/dt < 0,017$ bis $0,028 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ akzeptierbar. Diese Werte sind jedoch nur für die von Brooker und Hamilton untersuchten Gewässer gültig. Deshalb sollte zur Festlegung von Grenzwerten jedes Gewässer individuell beurteilt werden, wobei das ursprüngliche, natürliche Abflussregime und die Gewässer-geometrie zu berücksichtigen sind.

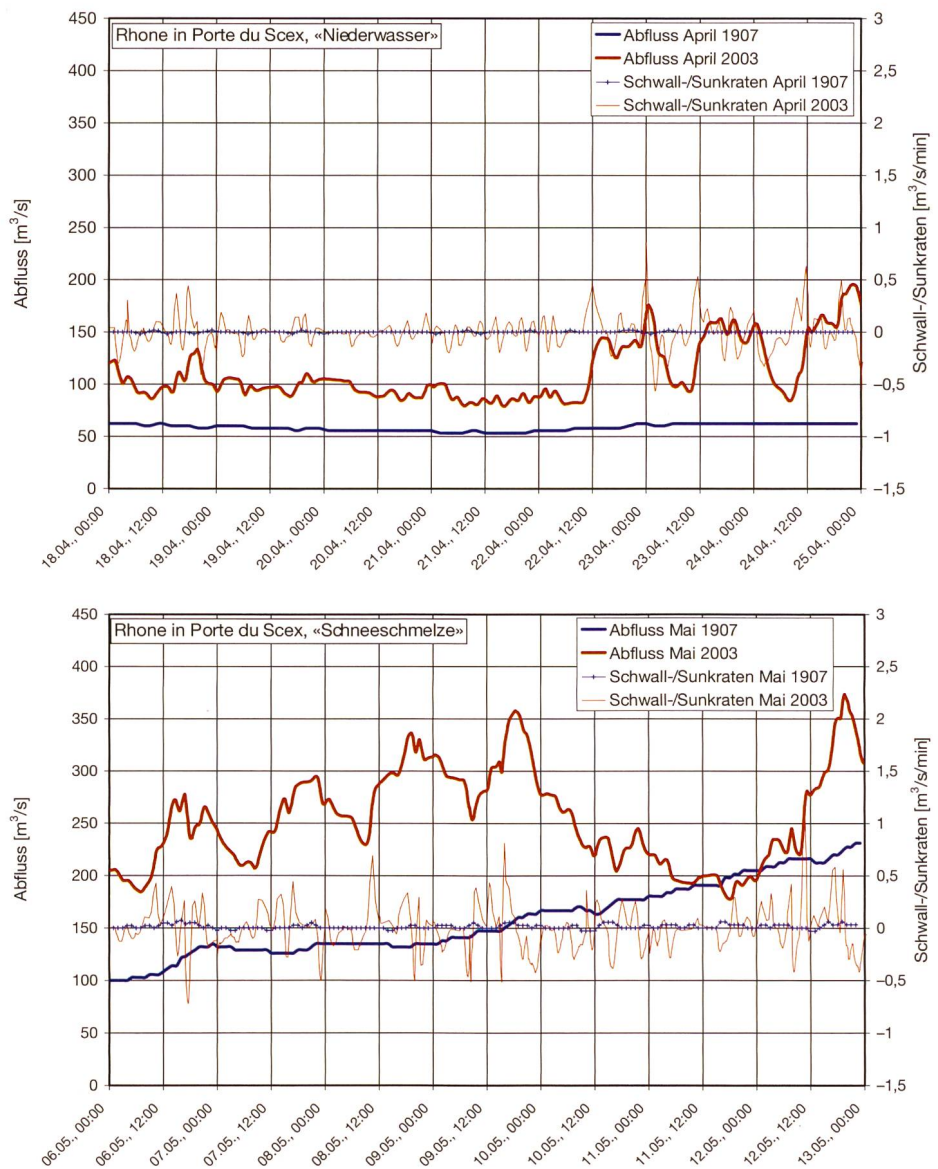


Bild 10. Vergleich von charakteristischen Wochen der Jahre 1907 und 2003. April: Niederwasserbedingungen (1907). Mai: Schneeschmelze (1907).

Von besonderem Interesse ist die Aufteilung der Schwall- und Sunkraten auf die einzelnen Monate. Nimmt man zum Vergleich die Jahre 1907 und 2003, so geht aus Bild 14 hervor, dass für 1907 drei typische Perioden unterschieden werden können: 1) Wintermonate (November bis April) mit geringen Schwall- und Sunkraten. 2) Übergangsmo-nate (Mai und Oktober) mit mittleren Schwall- und Sunkraten. 3) Sommermonate (Juni bis September) mit hohen Schwall- und Sunkraten. Diese Perioden verschieben sich selbstverständlich in Abhängigkeit der meteorologischen Gegebenheiten innerhalb eines bestimmten Jahres. Die Aufteilung in Winter-, Übergangs- und Sommermonate dürfte aber allgemein gültig sein. Für 2003 (wie für sämtliche Jahre von 1998 bis 2003) ist in Porte du Scex für die einzelnen Monate keine Aufteilung in typische Perioden mehr feststellbar. Sämtliche Monate gleichen hinsichtlich der Schwall- und Sunkraten am ehesten noch den Sommermonaten des Jahres 1907.

Dies ist in Bild 15 mit Hilfe der monatlichen Mittelwerte der Schwall- und Sunkraten mit den zugehörigen Standardabweichungen verdeutlicht. Der Mittelwert ist in allen Fällen erwartungsgemäss nahezu Null. Für 1907 beträgt die Standardabweichung für die Sommermonate $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$, für die Übergangsmo-nate $0,05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$ und für die Wintermonate lediglich noch $0,01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$. Für 1998 bis 2003 ist die Standardabweichung konstant und beträgt in allen Perioden rund $0,23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{min}$.

Standardabweichung, Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Bild 13) und Beobachtungswahrscheinlichkeit (Bild 14) von Schwall- und Sunkraten könnten dazu dienen, die hydrologische Beeinflussung eines Gewässers durch künstlichen Schwall und Sunk zu charakterisieren. Ist das Gewässer anthropogen beeinflusst, so sollte ein unbeeinflusstes Gewässer zum Vergleich herangezogen werden, welches einen ähnlichen mittleren Jahresabfluss und einen vergleich-

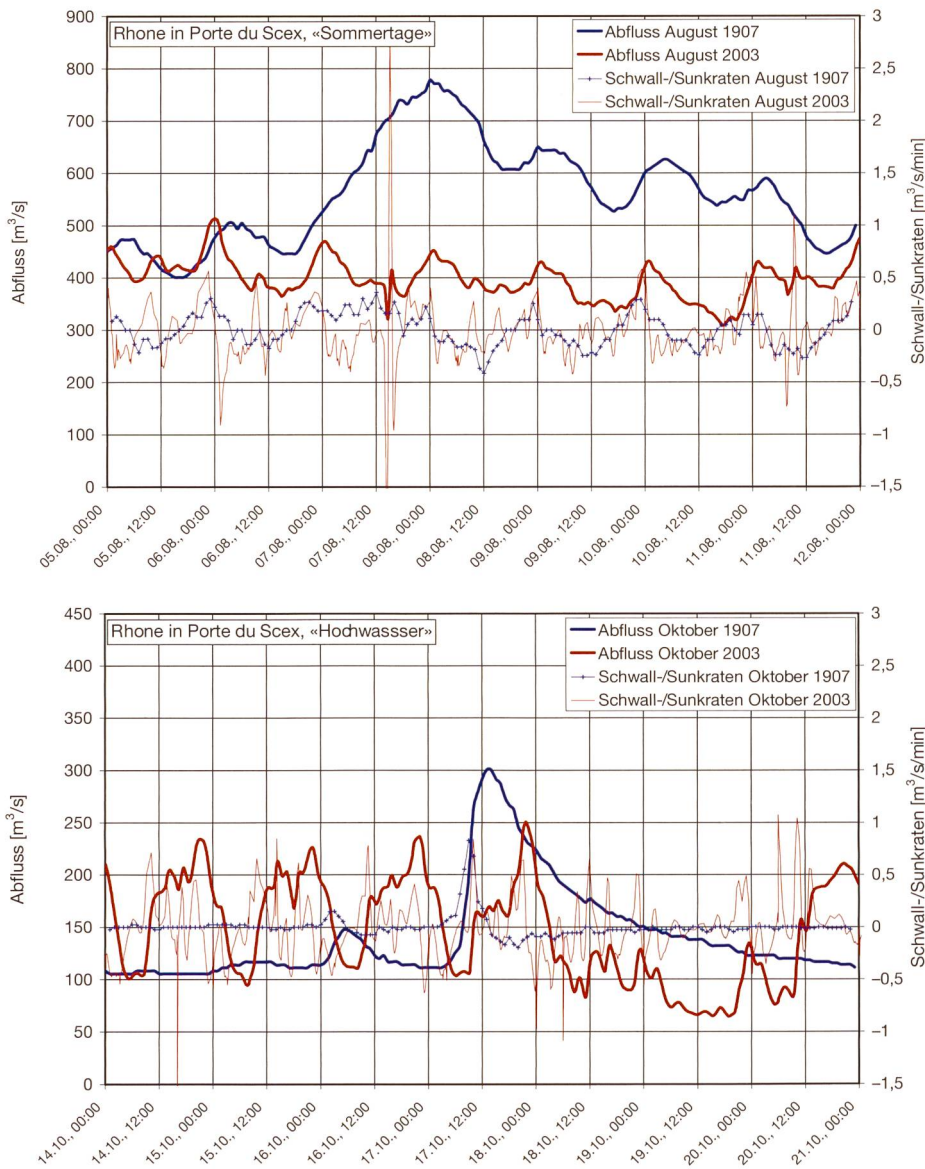


Bild 11. Vergleich von charakteristischen Wochen der Jahre 1907 und 2003. August: heisse Sommertage (1907). Oktober: Herbsthochwasser (1907).

	1907, Porte du Scex	2003, Porte du Scex
Vorhandensein des Tageszyklus	Bei Schönwetter während der Monate (Mai), Juni, Juli, Aug., Sept., (Okt.)	Während des ganzen Jahres ausser an Wochenenden/Feiertagen
Durchgang der Tagesspitze	Meistens ein Maximum zwischen 3 und 6 Uhr morgens	Ein oder mehrere Maxima (15 Uhr, 18 Uhr, 21 Uhr oder 24 bis 3 Uhr)
Gründe für den typischen Tageszyklus	Überlagerung von Schneeschmelze, Gletscherschmelze, Niederschlag	Überlagerung der Rückgabewassermengen der Zentralen, der Schnee- und Gletscherschmelze sowie der Niederschläge
Schönwetterperioden mit hohen Temperaturen...	...führen zu hohen Tages- und Nachtabflüssen sowie zu deutlichen Tageszyklen.	...verringern den Einfluss der Rückgabewassermengen teilweise, sodass der natürliche Tageszyklus wieder dominiert.

Tabelle 4. Zusammenfassung des Vergleichs der Jahresganglinien von 1907 mit 2003.

baren natürlichen Regimetypp besitzt (gemäss Weingartner & Aschwanden, 1992). Dadurch können die Abweichung vom natürlichen Abflussregime erfasst sowie die Auswirkungen von wasserbaulichen und betrieblichen Massnahmen quantifiziert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Auswertungen zeigen, wie sich die mittleren Jahres-, Monats- und Tagesabflüsse sowie die Tagesganglinien der Rhone im Verlaufe des letzten Jahrhunderts verändert haben. Dazu wurden historische und aktuelle Daten von den drei Messstationen der Landeshydrologie – Sion, Branson und Porte du Scex – ausgewertet. Die Rhone

von 1907 wird dabei als hydrologisch unbeeinflusstes Referenzgewässer erachtet.

Während die festgestellten Veränderungen bei den Monatsmitteln, Tagesmitteln und Ganglinien durch den Bau respektive Betrieb der grossen Speicherkraftwerke begründet sind, ist die Veränderung der mittleren Jahresabflüsse klimatischen Faktoren zuzuordnen. Es kann gezeigt werden, dass die mittleren Jahresabflüsse zwischen 1905 und 2003 in Porte du Scex statistisch signifikant zugenommen haben. Dasselbe gilt für die mittleren Jahrestemperaturen in Sion.

Die mittleren Monatsabflüsse in Porte du Scex wurden zur Bestimmung der Pardé-Koeffizienten verwendet. Diese wiederum erlauben das Jahresabflussregime der Rhone zu quantifizieren. Vergleicht man die mittleren Pardé-Koeffizienten der Periode vor dem Ausbau der grossen Speicherkraftwerke mit der Periode nach Fertigstellung derselben, so zeigt sich, dass das Abflussregime der Rhone in Porte du Scex früher vom Typ «Glacio-nival (b)» bis «Nivo-glaciaire» war. Heute ist das Abflussregime am selben Ort vom Typ «Nival de transition» bis «Nivo-pluvial préalpin». Dies verdeutlicht, dass das summierte Nutzvolumen der Speicherseen von rund 1200 Mio. m³ die Verschiebung eines Teils der jährlichen Wassermenge zur Abdeckung des Spitzenenergiebedarfs ins Winterhalbjahr erlaubt.

Verglichen wurden auch die Dauerkurven der Tagesmittel in Porte du Scex. Während rund 80 Tagen im Winter sind die Tagesmittel im Vergleich zu früher mindestens verdoppelt, während 30 Tagen im Sommer hingegen beträgt die Abnahme 100 m³/s und mehr. Die Abnahme des jährlichen Höchstabflusses Q₁ beträgt im Mittel 120 m³/s.

Die Ganglinien von 1907 und 2003 wurden für vier typische Wochen in Porte du Scex dargestellt, für eine Niederwasserwoche, Schneeschmelzwoche, Sommerwoche und Herbstwoche des Jahres 1907 (Bilder 10 und 11). Nur im Sommer ist das Abflussregime bezüglich Schwall- und Sunkraten wenig beeinflusst, da während heisser Sommertage der natürliche Abfluss der nicht genutzten Teileinzugsgebiete dominiert. In den übrigen Jahreszeiten ist der Einfluss der verschiedenen Zentralen auf die Abflussverhältnisse deutlich erkennbar.

Die Schwall- und Sunkraten (dQ/dt) eignen sich zur Charakterisierung der häufig wechselnden Abflussverhältnisse. Dieser Indikator wurde gewählt, da er auf eine beliebige Morphologie des Gewässers angewendet werden kann. So können zum Beispiel für bestimmte Schwall- und Sunkraten die zugehörigen Geschwindigkeits- oder Abflusstiefenänderungen in kanalisiertem oder revitalisierten Gewässerabschnitten berechnet wer-

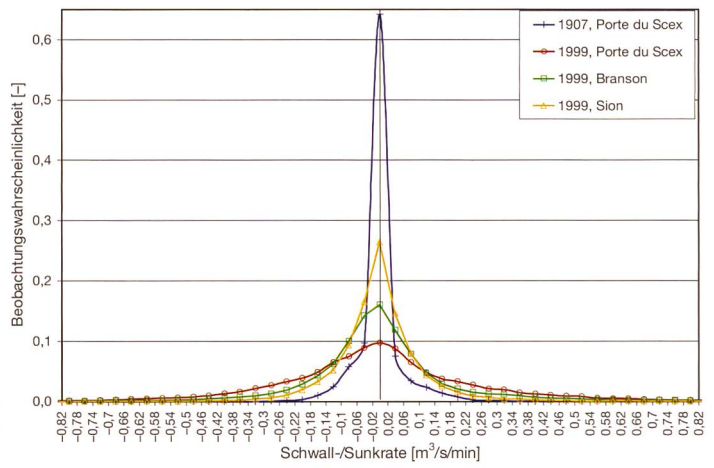
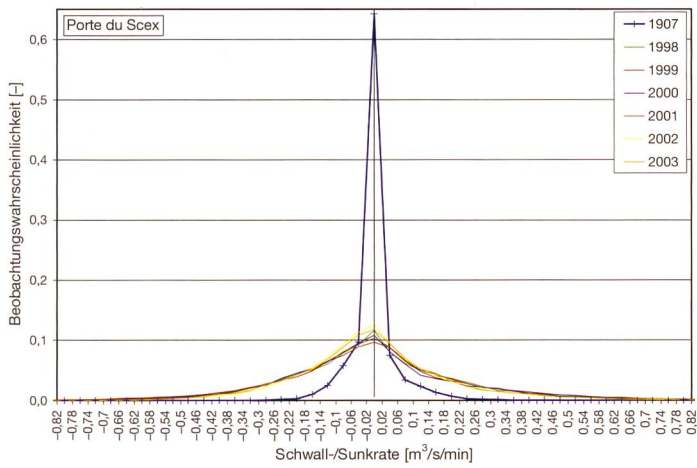


Bild 12. Jährliche Beobachtungswahrscheinlichkeiten der Schwall- und Sunkraten. Links: Porte du Scex 1907 und 1998–2003. Rechts: Porte du Scex 1907 und Porte du Scex, Branson, Sion 1999.

den. In diesem Beitrag wurden die Schwall- und Sunkraten normalisiert, um die einzelnen Jahre und Messstationen untereinander vergleichen zu können. So konnten Beobachtungswahrscheinlichkeiten von bestimmten Schwall- und Sunkraten sowohl für 1907 als auch für die Jahre 1998 bis 2003 bestimmt und verglichen werden. Betrachtet man die Standardabweichung der Schwall- und Sunkraten vom Mittelwert zeigt sich, dass diese seit 1907 deutlich zugenommen haben und dass die Schwallbeeinflussung in Fließrichtung der Rhone zunimmt.

Werden die Monate bezüglich Schwall- und Sunkraten einzeln untersucht, soll in Wintermonate, Übergangsmonate und Sommermonate aufgeteilt werden. Es bestätigt sich, dass die Sommermonate der Jahre 1907 und 1998–2003 vergleichbar sind. Für die Wintermonate sind die beobachteten Schwall- und Sunkraten deutlich verschieden. Der heutigen Rhone fehlen demzufolge insbesondere die «Ruhemonate» im Winter mit vorwiegend niedrigem, praktisch konstantem Abfluss und geringer Trübung. Die relativ geringe Qualität der Rhone als Lebensraum, welche sich zum Beispiel in der geringen Besiedelung durch wirbellose Organismen des Benthos (Baumann & Meile, 2004) oder im schlechten Zustand der Fischfauna (Peter & Weber, 2004) widerspiegelt, ist nebst der Kanalisierung der Rhone auf die häufig und stark ändernden Abflussverhältnisse während der Wintermonate zurückzuführen.

Die vorgestellte Studie zeigt, wie das Abflussregime der Rhone früher war und wo die Unterschiede zu heute liegen. Mit den gewonnenen Resultaten können die Auswirkungen von fluss- und wasserbaulichen Massnahmen, wie sie beispielsweise am Laboratoire de constructions hydrauliques in Lausanne im Rahmen des Rhone-Thur-Forschungsprojektes untersucht werden, auf

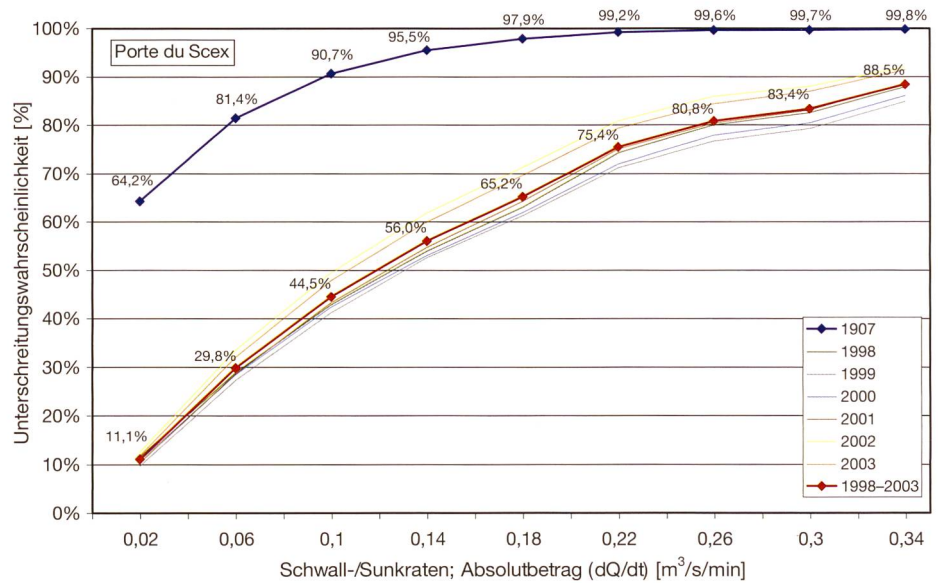


Bild 13. Unterschreitungswahrscheinlichkeit (y-Achse) gegebener Schwall- und Sunkraten (x-Achse) bei Porte du Scex.

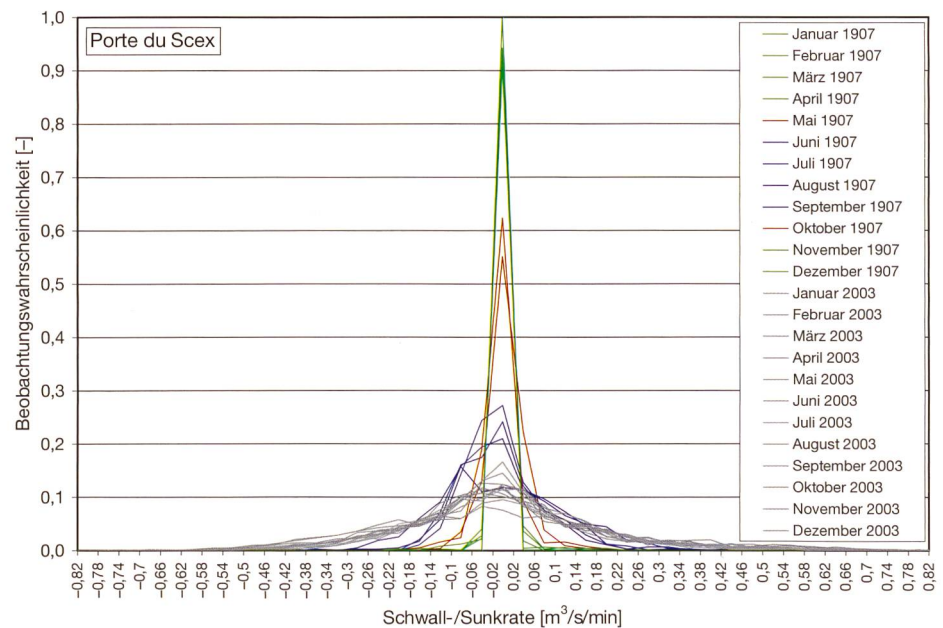


Bild 14. Monatliche Beobachtungswahrscheinlichkeiten der Schwall- und Sunkraten in Porte du Scex für 1907 und 2003. Grün: Wintermonate 1907 (November–April). Rot: Übergangsmonate 1907 (Oktober, Mai). Blau: Sommermonate 1907 (Juni–September). Grau: Alle Monate 2003.

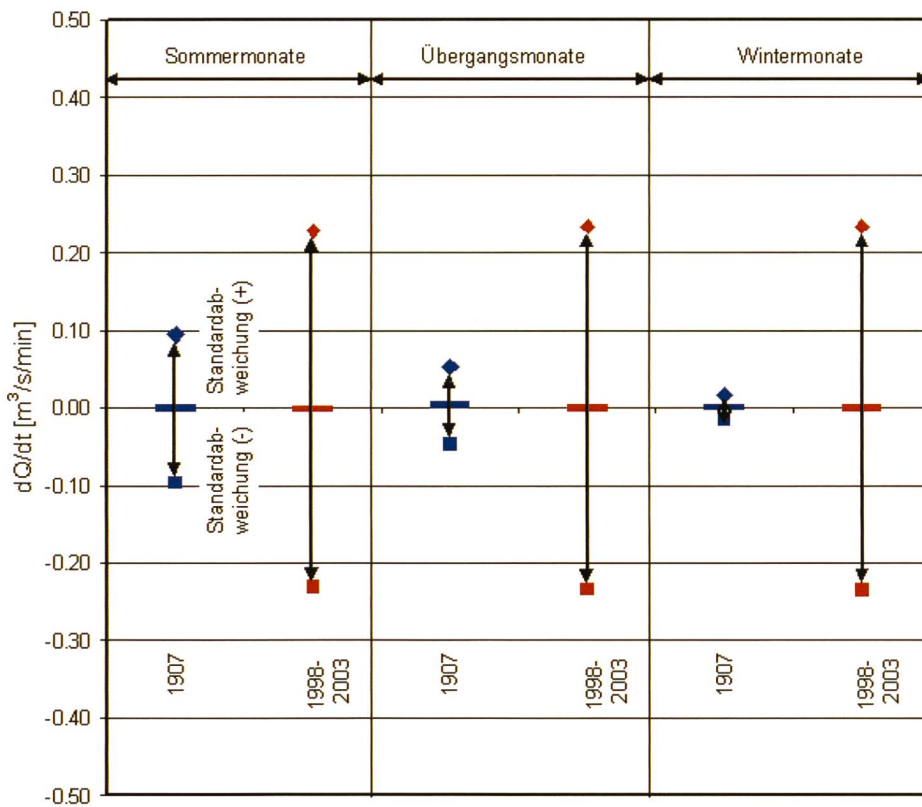


Bild 15. Mittelwerte und Standardabweichung der Schwall- und Sunkraten in Porte du Scex für 1907 (blau) und 1998–2003 (rot), aufgeteilt in Sommermonate, Übergangsmonate und Wintermonate.

das Abflussregime und insbesondere auf die Schwall- und Sunkraten quantifiziert werden. Andererseits besteht noch ein gewisser Forschungsbedarf, welcher die minimalen Anforderungen an ein Abflussregime hinsichtlich Gewässerökologie verdeutlicht.

Verdankung

Die Daten wurden durch die Landeshydrologie erfasst und zur Verfügung gestellt. Bei der Aufbereitung und Auswertung der Rohdaten haben Ronny Moser und Frédéric Loup, Bauingenieurstudenten der EPFL, wertvolle Hilfe geleistet.

Literatur

Baumann P., Meile T. (2004): Makrozoobenthos und Hydraulik in ausgewählten Querprofilen der Rhone. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 96. Jahrgang 2004, Heft 11/12, pp. 320–325.

Birsan M.-V., Molnar P., Pfandler M., Burlando P. (2004): Trends in schweizerischen Abflussmessreihen. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 96. Jahrgang 2004, Heft 1/2, pp. 29–38.

Boillat J.-L., Oehy Ch., Schleiss A. (2003): Reservoir Sedimentation Management in Switzerland, The 3rd World Water Forum, Challenges to the Sedimentation Management for Reservoir Sustainability, March 2003, pp. 143–158, 2003.

Brooker, M. P. (1981): The impact of Impoundments on the downstream Fisheries and general ecology of rivers. *Adv. Appl. Biol.* 6, pp. 91–152.

BWG (2002): Hochwasser 2000 – Les crues 2000, Ereignisanalyse/Fallbeispiele – Analyse des évé-

nements/Cas exemplaires. Berichte des BWG, Serie Wasser, Bern.

DSFB (2000): Dritte Rhonekorrektur, Sicherheit für die Zukunft, Synthesebericht. Kanton Wallis, Dienststelle für Strassen- und Flussbau, Juni 2000, Sitten.

Fette M., Hoehn E., Wehrl B. (2004): Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 96. Jahrgang 2004, Heft 11/12, pp. 301–304.

Hamilton R., Buell J. W. (1976): Effects of modified hydrology on Campbell River salmonids. Environment Canada, Fisheries and Marine Service, Technical Report Series No. PAC/T-76-20.

Kundzewicz, Z. W., Robson A. (2000): Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program – Water, WMO/Unesco, WCDMP-45, WMO/TD 1013, Geneva.

Loizeau J.-L., Dominik J. (2000): Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences* 62: 54–67.

Maisch M., Paul F. und Käab A. (2004): Kenngrößen, Flächen- und Volumenänderungen der Gletscher 1850–2000. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 3.10, Landeshydrologie und -geologie (Hrsg.), Bern.

Meier W., Frey M., Moosmann L., Steinlin S., Wüest A. (2004): Wassertemperaturen und Wärmehaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche. Schlussbericht SP I-2, Rhone-Thur-Projekt, Eawag, WSL: 100 Seiten.

Peter A., Weber Ch. (2004): Die Rhone als Lebensraum für Fische. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 96. Jahrgang 2004, Heft 11/12, pp. 326–330.

Portmann M., Baumann P. & Imhof B. (2004): Schwebstoffhaushalt und Trübung der Rhone. Publikation des Rhone-Thur-Projekts c/o Eawag, Kastanienbaum.

Raboud P.-B., Dubois J., Boillat J.-L., Costa S., Pitteloud P.-Y. (2001): Projet Minerve – Modélisation de la contribution des bassins d'accumulation lors des crues en Valais. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 93. Jahrgang, Heft 11/12, pp. 313–317.

Schädler B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung der Landeshydrologie, Nr. 6, Bern.

Schälchli U. (1993): Die Kolmation von Fließgewässersohlen. Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 124, ETH Zürich.

Schleiss A., Oehy Ch. (2002): Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. *Wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 94. Jahrgang 2002, Heft 7/8, pp. 227–234.

SFRD (1964): La correction du Rhône en amont du lac Léman. Publication du Service fédéral des routes et des digues (Département fédéral de l'intérieur), Bern.

Supan A. (1895): Untersuchungen über die tägliche Periode der Wasserführung und die Bewegung von Hochfluten in der oberen Rhone. Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt, 41. Band, 1895, pp. 129–169.

Utrecht E. (1906): Die Ablation der Rhone in ihrem Walliser Einzugsgebiete im Jahre 1904/05, Zeitschrift für Gewässerkunde, 7. Band, Heft 5, pp. 257–320.

Weingartner R., Aschwanden H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Landeshydrologie und -geologie (Hrsg.), Bern.

Anschrift der Verfasser

Tobias Meile, Dipl. Bauing., Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ENAC ICARE LCH, GC A3 504 (Bâtiment GC), Station 18, CH-1015 Lausanne, tobias.meile@epfl.ch

Anton Schleiss, Prof. Dr. Dipl. Bauing., Laboratoire de constructions hydrauliques, anton.schleiss@epfl.ch

Jean-Louis Boillat, Dr. Dipl. Bauing., Laboratoire de constructions hydrauliques, jean-louis.boillat@epfl.ch