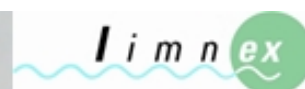




www.rhone-thur.eawag.ch



Schwebstoffhaushalt und Trübung der Rhone

Publikation des
"Rhone-Thur Projekts"

Mira Portmann, Peter Baumann,
Barbara Imhof

Oktober 2004



Zusammenfassung

Schwebstoffhaushalt und Trübeverhältnisse wurden durch den starken Ausbau der hydroelektrischen Speicherkraftwerke im 20. Jahrhundert in vielen Alpenflüssen verändert. Weil die Schwebstoffführung und die dadurch bedingte Trübung des Wassers das Ökosystem eines Fließgewässers wesentlich beeinflussen können, sind ihre heutige und ihre ursprüngliche Ausprägung in der Rhone im Rahmen des Rhone-Thur Projektes näher untersucht worden. Das Schwergewicht lag dabei auf den Verhältnissen im Winter, weil sich der Schwallbetrieb der Wasserkraftwerke dann besonders stark auswirkt.

Für die Auswertungen standen aktuelle Schwebstoff- und Trübungswerte aus den Jahren 2002/03 sowie Vergleichsdaten der Schwebstoff-Konzentration für die Zeit nach 1965 (mit Kraftwerkseinfluss) und für die Periode 1904/05 (ohne Kraftwerkseinfluss) zur Verfügung. Im Winter 2002/03 war das Rhonewasser bei tiefem Abfluss (z.B. an den Wochenenden) offenbar aussergewöhnlich klar. Schwebstoffgehalt und Trübung der Rhone weichen heute v.a. im Winter stark von den natürlichen Verhältnissen ab, was hauptsächlich durch die Speicherkraftwerke mit ihrem Schwallbetrieb bedingt ist. 1904/05, also vor dem Bau dieser Kraftwerke, war der Schwebstofftransport im Winter deutlich geringer als heute. Sogar die vergleichsweise klaren Sonntage im Winter 2002/03 erreichten das natürliche Niveau nicht. Noch wesentlich stärker über die natürlichen Winterwerte steigen Schwebstoffkonzentration und Trübung während der werktäglichen Kraftwerks-Schwälle. Hingegen ist der Schwebstofftransport im Sommer heute kleiner, da das besonders trübe Schneeschmelz- und Gletscherwasser in den Speicherseen teilweise zurückgehalten wird. Es ist also tendenziell eine saisonale Verlagerung der Schwebstofftransportes in der Rhone festzustellen. Der weitaus grösste Teil der Jahresfracht (ca. 96%) fällt aber nach wie vor im Sommerhalbjahr an.

Die tiefen Trübewerte des Winters 2002/03 fielen erstaunlicherweise auf eine Zeit mit überdurchschnittlichen Abflüssen in der Rhone. Vermutlich war eine stärkere Exfiltration von Grundwasser und die damit verbundene "Verdünnung" des Flusswassers die Ursache für das ungewöhnliche Aufklaren. Ebenso bemerkenswert erscheint, dass das Rhonewasser zu gewissen Zeiten durch turbiniertes Wasser aus dem extrem schwebstoffarmen Lac d'Emosson messbar "geklärt" wird.

Für die ökologischen Auswirkungen der veränderten winterlichen Schwebstoff- und Trübeverhältnisse sind das Ausmass und die Dauer der Konzentrations-Zunahme massgebend. Zwar liegen auch die heutigen, deutlich erhöhten Winterwerte immer noch weit unter den natürlichen Konzentrationen des Sommerhalbjahres und absolut betrachtet in einen gewässerökologisch noch nicht als schädlich beurteilten Bereich. Andererseits gehen Schwebstoffgehalt und Trübung im Winter heute (relativ gesehen) so weit über den tiefen natürlichen Background hinaus, dass trotzdem von relevanten Auswirkungen auf den Lebensraum und die Lebensgemeinschaft des Gewässers auszugehen ist. Bezogen auf die Lichtverhältnisse sind derartige Auswirkungen v.a. für den stark schwallbeeinflussten Unterlauf der Rhone flussabwärts von Riddes festgestellt worden.

Titelbild:

Bewuchs durch fädige Grünalgen am Ufer der Rhone bei Chippis im Frühjahr 2003.

INHALTSVERZEICHNIS	SEITE
ZUSAMMENFASSUNG	2
1 EINLEITUNG	4
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung	4
1.2 Grundlagen zum Schwebstoffhaushalt der Rhone	4
2 SCHWEBSTOFFKONZENTRATION IN DER RHONE BEI PORTE DU SCEX	7
2.1 Entwicklung der Konzentrationen	7
2.2 Minimale Konzentrationen	8
2.3 Maximale Konzentrationen	9
2.4 Schwall – Sunk	10
3 BEZIEHUNG ZWISCHEN SCHWEBSTOFFFEN UND TRÜBUNG	12
3.1 Berechnung der Schwebstofffracht	12
3.2 Ausreisser	13
4 BESCHREIBUNG DES SCHWEBSTOFFTRANSPORTES IM JAHR 2003	14
4.1 Verteilung nach Monaten/Jahreszeiten	14
4.2 Verteilung nach einzelnen Tagen	14
4.3 Besonderheiten im Jahr 2003	15
5 VERGLEICH DER SCHWEBSTOFFFRACHT 2003 MIT FRÜHEREN JAHREN	18
5.1 Verschiedene Methoden zur Berechnung der Schwebstofffracht	18
5.2 Vergleich mit den natürlichen Bedingungen von 1904/05	19
5.3 Vergleich mit den Jahren 2000-2002	21
5.4 Entwicklung der monatlichen Schwebstofffrachten	21
6 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER VERÄNDERTEN TRÜBEVERHÄLTNISSE	23
6.1 Gesamthafte Beurteilung	23
6.2 Das Lichtklima als Beispiel für eine indirekte Auswirkung	25
7 LITERATURVERZEICHNIS	30
ANHANG	

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

An der Rhone finden seit 2001 umfangreiche Aufnahmen des aktuellen Gewässerszustandes im Rahmen des Rhone-Thur Projektes von EA-WAG, WSL, EPFL und VAW statt (www.rhone-thur.eawag.ch). Für die Untersuchung der Trübeverhältnisse in der Rhone war ursprünglich ein eigenes Subprojekt geplant, das aber nicht zustande gekommen ist.

Die Trübung bzw. Schwebstoffführung ist in Alpenflüssen eine wichtige Steuergrösse für die abiotischen und biotischen Verhältnisse im Gewässer. So wurde etwa für den Alpenrhein gezeigt, dass sich die Trübung u.a. auf das Lichtklima, auf die Ausdehnung des pflanzlichen Bewuchses, auf die Kolmation und auf die Entwicklung der Forelleneier auswirkt (ARGE Trübung Alpenrhein, 2001).

In Gewässern mit Schwallbetrieb, wie er auch an der Rhone sehr ausgeprägt herrscht, kann die Trübung sowohl jahres- als auch tageszeitlich stark beeinflusst werden (Baumann & Klaus, 2003). Die Kenntnis der aktuellen und der ursprünglichen — nicht durch Schwallbetrieb veränderten — Schwebstoff- bzw. Trübungsverhältnisse in der Rhone ist deshalb eine wichtige Grundlage für die Beschreibung des aquatischen Systems und für die Formulierung von Zielvorstellungen zum künftigen Gewässerszustand. Der Winter 2002/03 bietet ideale Voraussetzungen für die Ermittlung dieser mutmasslichen ursprünglichen Verhältnisse, war das Rhonewasser in dieser Zeit doch während der abflussarmen Wochenenden (bei stark reduziertem Schwallbetrieb) oft sehr klar.

Im vorliegenden Bericht werden aktuelle Schwebstoff- und Trübungsdaten der Rhone sowie ein älterer Datensatz zur Schwebstoffführung in der Zeit vor Inbetriebnahme der grossen Wasserkraftwerke dargestellt und interpretiert. Bei der vorangegangenen Datenauswertung standen folgende Aspekte und Fragestellungen im Mittelpunkt:

- Die wegen des Gletschereinflusses sehr stark schwankenden saisonalen Wertebereiche und sommerlichen Tagesverläufe der Schwebstoffkonzentration und -fracht.

- Die Veränderung der Trübung und der Schwebstoffkonzentration durch den Schwallbetrieb der Speicherkraftwerke, welcher in der Rhone hauptsächlich im Winter sehr ausgeprägt ist und von Brig bis Porte du Scex kontinuierlich zunimmt (Baumann, 2004).
- Der mutmassliche Einfluss der festgestellten Wertebereiche von Trübung bzw. Schwebstoffkonzentration auf den Lebensraum und die Lebensgemeinschaft des Flusses, soweit sich dies aus Erfahrungen und Untersuchungen an der Rhone selbst und an anderen Gewässern abschätzen lässt.

1.2 Grundlagen zum Schwebstoffhaushalt in der Rhone

Auf Initiative von verschiedenen Sachbereichen innerhalb des Rhone-Thur-Projektes zeichnet die schweizerische Landeshydrologie und -geologie (LHG) an den Abflussmessstation Porte du Scex (kurz vor der Mündung in den Lac Léman) seit dem 1.11.2002 die Trübung der Rhone mittels einer Sonde alle 10min auf. An derselben Stelle werden durch die LHG zudem seit 1965 die Schwebstoffkonzentration in zweimal wöchentlich entnommenen Stichproben bestimmt und seit 1904 der Abfluss kontinuierlich aufgezeichnet. Einzelheiten zu den verwendeten Entnahme- und Messmethoden geben Binderheim-Bankay & Jakob (1999a,b). Die jüngsten Datensätze der Rhone bei Porte du Scex zu Abfluss, Schwebstoffen und Trübung bilden die Hauptgrundlage des vorliegenden Berichtes. Weitere Daten zur Schwebstoff-Konzentration und zur Trübung der Rhone liegen ab 2003 auch für die Abfluss-Messstation Brig der LHG vor; da die Trübung bei Brig aber nur während weniger Sommerwochen (bei hohem Wasserstand) einwandfrei gemessen wurde, ist diese Station hier nicht weiter berücksichtigt.

Die Firma Limnex AG hat innerhalb des Rhone-Thur Projektes den Sachbereich Phyto- und Makrozoobenthos bearbeitet (Baumann, 2004) und dabei während der Winter 2001 und 2002 zusammen mit der Firma ETEC auch einige Schwebstoff- und Lichtmessungen in der Rho-

ne durchgeführt. Diese Daten sind in Kapitel 6.2 des vorliegenden Berichtes eingeflossen.

Daneben existieren für verschiedene Jahre vor, während und nach der Periode von 1950 bis ca. 1975 (Inbetriebnahme der grossen, schwall-erzeugenden Speicherkraftwerke) weitere, mehr oder weniger umfangreiche Datensätze der Schwebstoffkonzentration in der Rhone bei Porte du Scex (Utrecht, 1906; Loizeau & Dominik, 2000, 2001) und bei Brigerbad (Peters-Kümmerly, 1971). Für die vorliegenden Auswertungen wurde der Datensatz von Utrecht (1906) herangezogen, welcher einen vollständigen Jahrgang der Schwebstoffkonzentration von April 1904 bis März 1905 umfasst.

Collet et al. (1916) haben die Datenreihe von 1904/05 kritisch geprüft und nur einen Einwand geltend gemacht: Die Entnahme der Wasserproben erfolgte meistens nachmittags um 15⁰⁰ Uhr und damit zu einer Zeit, in der die Rhone damals (wie an gewissen Tagen auch heute noch) beinahe ihren tiefsten Wasserstand im Tagesverlauf erreichte. Weil im Sommerhalbjahr gleichzeitig auch der Schwebstoffgehalt des Wassers noch weit unter dem Tages-Durchschnitt lag (Abbildung 1), korrigierten Collet et al. (1916) die Werte der Sommermonate 1904 nach oben. Die verwendeten Korrekturfaktoren liegen im Juni mit +16% und im Juli mit +13% weitaus am höchsten, in den Monaten Mai sowie August bis Oktober mit +3% bis +6% hingegen schon wesentlich tiefer. Für das Winterhalbjahr wurden die Originaldaten unverändert übernommen. Im vorliegenden Projekt dienen die Sommerwerte 1904 nur bei wenigen Auswertungen als Referenz (Monats- und Tagesfrachten der Schwebstoffe in den Abbildungen 25 und 26); es werden hier deshalb als natürliche, vom Kraftwerksbetrieb noch nicht beeinflusste Vergleichswerte von 1904/05 einheitlich die unkorrigierten Originaldaten von Utrecht (1906) verwendet.

Eine weitere Unsicherheit bezüglich der Schwebstoffdaten von 1904/05 betrifft die verwendete Analysemethode. Nach den Angaben von Utrecht (1906) wurde jeweils eine unfiltrierte und eine filtrierte Teilmenge der Wasserprobe eingedampft und die Menge des suspendierten Materials (Schwebstoffgehalt) als Differenz der beiden unabhängig voneinander gewogenen Trockenrückstände bestimmt (Ge-

samrückstand minus gelöstes Material). Unklar bleibt, welche Filter dabei verwendet wurden. Nach Angaben der Landeshydrologie (Diem, mündl. Mitteilung) handelte es sich wahrscheinlich um gehärtete Filterpapiere ähnlich jenem, das z.B. Schmassmann (1947) beschreibt. Danach dürfte die Porenweite der Filter, d.h. die Korngrösse des kleinsten noch zurückgehaltenen Teilchens ca. $1\mu\text{m}$ bis höchstens $2\mu\text{m}$ betragen haben. Im Vergleich zu den heutigen Werten, die auf Filtration durch Glasfaser- oder Membranfilter mit Porenweiten von $0.45\mu\text{m}$ beruhen (definitionsgemäss die Grenze zwischen suspendiertem und gelöstem Material), wurde in den Proben von 1904/05 die feinste Fraktion $<2\mu\text{m}$ (Tonfraktion) nicht oder nur teilweise erfasst und die Schwebstoffkonzentrationen damit etwas unterschätzt. Der mögliche Fehler dürfte aber relativ gering bleiben, weil die Tonfraktion in der Rhone kaum einen grossen Anteil am Gesamtgewicht der Schwebstoffe hat. So stellten Müller & Förstner (1969) im Alpenrhein während des Sommerhalbjahres einen mittleren Anteil der Fraktion $<2\mu\text{m}$ von ca. 10% fest (bei einem Schwankungsbereich von ca. 2% bis ca. 20%).

Summiert man die beiden möglichen Fehlerquellen (ungünstige Tageszeit und fehlende Tonfraktion), so liegen die Angaben zur Schwebstoffkonzentration der Rhone von Utrecht (1906) im Vergleich zu jüngeren Messungen um maximal 30-35% zu tief. In vielen Fällen sind die Abweichungen aber deutlich geringer, und die Daten von 1904/05 damit direkt mit den heutigen Werten vergleichbar.

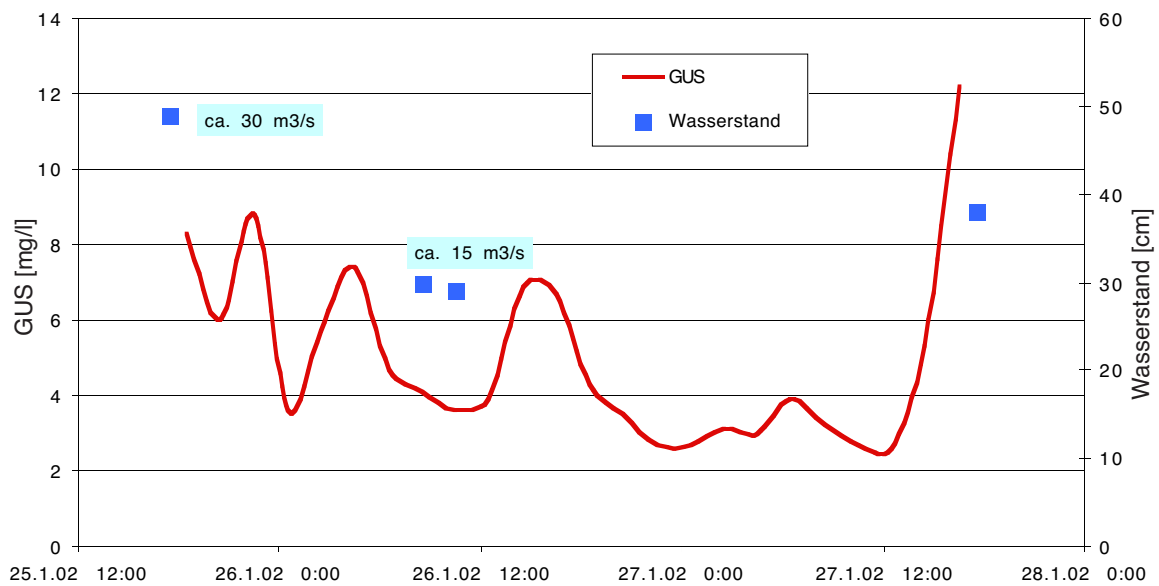
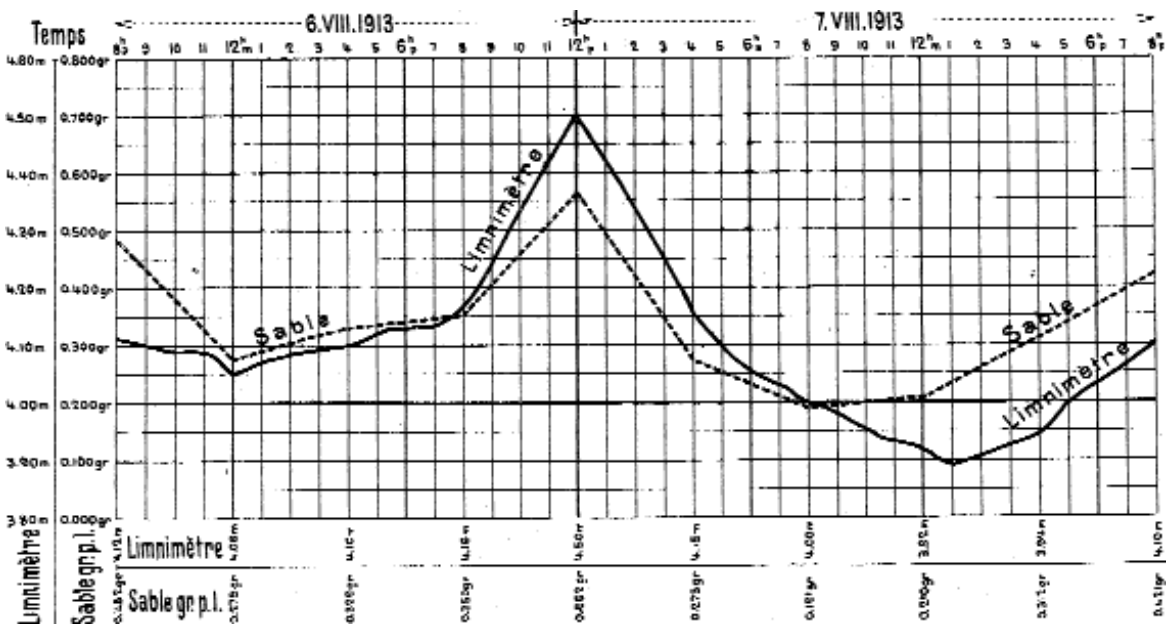


Abbildung 1: Oberes Bild: Verlauf des relativen Wasserstandes ("Limnimètre" als relative Höhe in m) und des Schwebstoff-Gehaltes ("Sable" in gr/l) in der Rhone bei Gampenen am 6./7.8.1913. Original-Abbildung aus Collet et al. (1916). Unteres Bild: Verlauf der Schwebstoff-Konzentration (GUS = gesamte ungelöste Stoffe) und Einzelmessungen des relativen Wasserstandes in der Rhone bei Leuk vom 25.-27.1.2002 (Freitag bis Sonntag). Bei zwei Wasserständen sind die zugehörigen Abflussmengen in der Rhone angegeben, die aus gleichzeitig durchgeführten Querprofilaufnahmen ermittelt wurden (Baumann, 2004).

2. Schwebstoffkonzentration in der Rhone bei Porte du Scex

In Porte du Scex wird die Schwebstoffkonzentration der Rhone seit 1965 2-mal wöchentlich im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie gemessen. Für jedes Jahr liegen also ca. 104 Messungen vor. Es muss beachtet werden, dass die Messungen immer an Werktagen (Mo – Fr) durchgeführt werden, wenn die Konzentration vom Kraftwerkbetrieb beeinflusst und somit üblicherweise höher sind als am Wochenende. Von April 1904 bis März 1905 hat Uetrecht (1906) täglich Wasserproben bei Porte du Scex entnehmen lassen und darin die Schwebstoffkonzentration bestimmt. Diese Daten können als natürliche Konzentrationen betrachtet

werden (ohne Einfluss von Kraftwerkbetrieb im Einzugsgebiet) und damit als Vergleichsbasis zu den beeinflussten Messwerten seit 1965 dienen (Kapitel 1).

2.1 Entwicklung der Konzentrationen

Um eine Entwicklung seit Beginn der Schwebstoffkonzentrations-Messungen 1965 erkennen zu können, wurden Zeitabschnitte von 10 Jahren verwendet und in Abbildung 2 als Summenkurven dargestellt. Eine deutliche Veränderung ist im dritten 10-Jahresabschnitt von 1985-1994

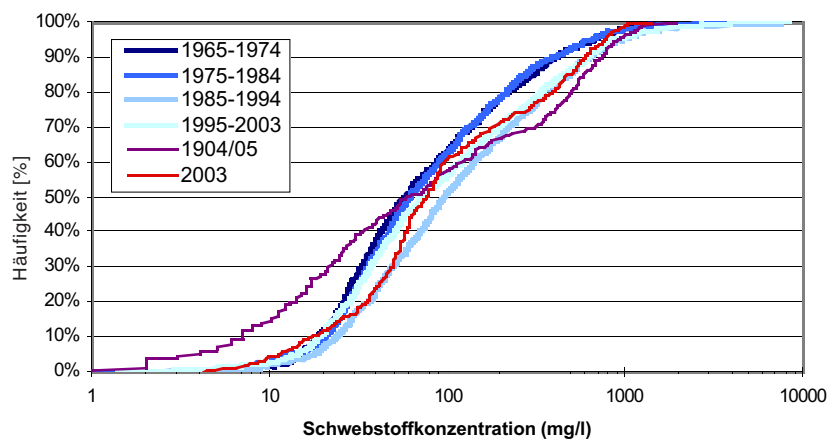


Abbildung 2: Verschiedene Summenkurven der Schwebstoffkonzentrationen der Rhone bei Porte du Scex. Für die Summenkurve des Jahres 2003 wurde die Konzentration jedes Tages mit Hilfe der C-Q-Beziehung der Jahre 1995-2003 berechnet.

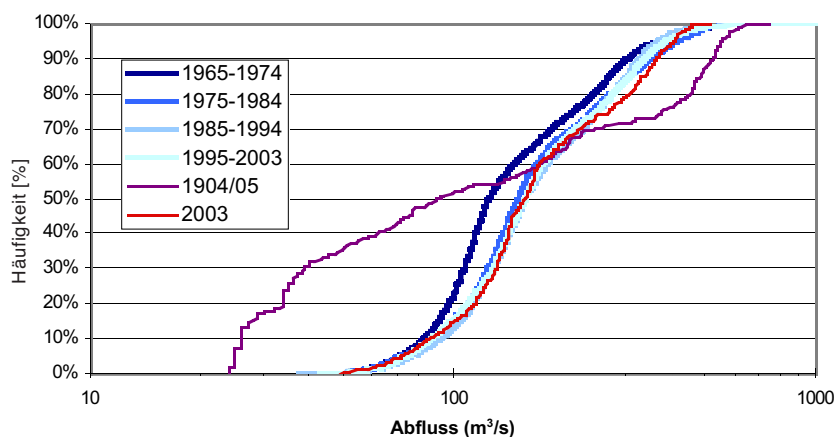


Abbildung 3: Summenkurven der mittleren Tagesabflüsse der Rhone bei Porte du Scex.

zu sehen, da die Konzentrationen durchgehend höher liegen als in den Summenkurven von 1965-74 und 1974-85. Der Grund dafür könnte eine allgemein höhere Produktion der Kraftwerke im Einzugsgebiet mit weniger oder kürzeren Ruhephasen an Wochenenden und Feiertagen sein. Die Summenkurve der letzten neun Jahre (1995-2003) zeigt aber keine Fortsetzung dieser Entwicklung. Im Bereich der kleinen Konzentrationen fielen die Werte wieder auf das Niveau von vor 1985 ab, während der Summenanteil von Messwerten über 100 mg/l ungefähr gleich blieb. Diese Entwicklung bedeutet eine geringfügige Annäherung an die natürliche Summenkurve (1904/05), die deutlich mehr kleine Werte, aber

auch eine grössere Anzahl an Konzentrationen im Bereich von 200-800 mg/l aufweist.

Da der Abfluss ein wichtiger Einflussfaktor der Schwebstoffkonzentration ist und zusätzlich auch das Turbinierverhalten der Kraftwerke im Einzugsgebiet der Rhone aufzeigt, sind in Abbildung 3 die Abflusssummenkurven

für denselben Zeitabschnitt wie in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ergibt sich aber ein etwas anderes Bild als bei der Entwicklung der Schweb-

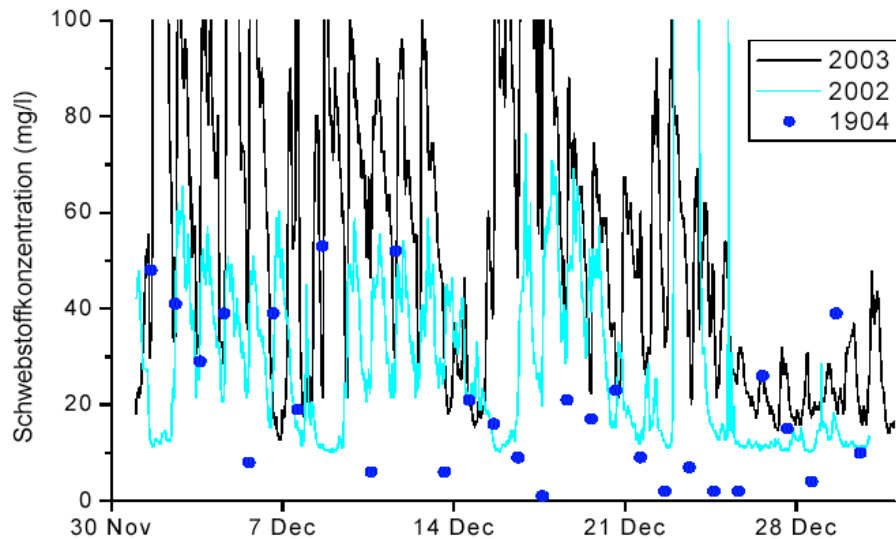


Abbildung 4: Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Dezember des Jahres 2002 und 2003 verglichen mit den täglichen Konzentrationsmesswerten aus dem Jahr 1904.

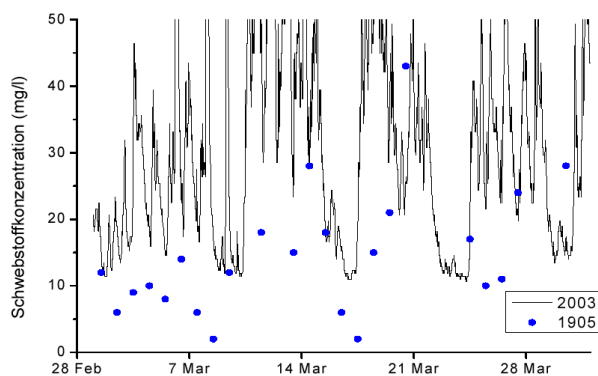
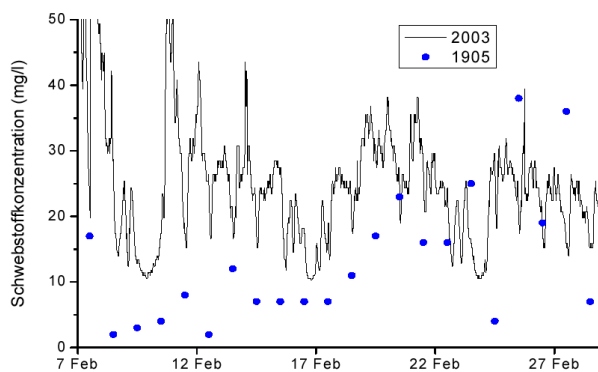


Abbildung 5 und 6: Verlauf der Schwebstoffkonzentration in Port du Scex während der Monate Dezember, Februar und März verglichen mit den täglichen Messwerten aus dem Jahr 1905. Der Monat Januar wurde nicht dargestellt, da 2003 ein Niederschlagsereignis zu ungewöhnlich hohen Konzentrationen für einen Wintermonat führte.

stoffkonzentration seit 1965. In den ersten zehn Jahren nach 1965 war der Abfluss der Rhone bei Porte du Scex ausser im ganz tiefen und ganz hohen Bereich deutlich geringer als in den nachfolgenden Zeitabschnitten, welche sich alle etwa auf dem gleichen Niveau befanden. Auch der Abfluss des Jahres 2003 liegt ziemlich genau auf diesem Niveau. Verglichen mit der Summenkurve von 1904/05 zeigt sich, dass im natürlichen Zustand der Anteil an Tagen mit kleinem Abfluss viel grösser war und mehr Tage mit einem mittleren Abfluss über $230 \text{ m}^3/\text{s}$ auftraten. Im natürlichen Zustand wiesen 30% der Tage einen Abfluss auf, der kleiner als $38 \text{ m}^3/\text{s}$ war. Seit 1965 ist jedoch nur an zwei Tagen ein Mittelwert von weniger als $38 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen worden.

2.2 Minimale Konzentrationen

In der Rhone treten sehr kleine Schwebstoffkonzentrationen ($<10 \text{ mg/l}$) in den Wintermonaten, vor allem von Dezember bis April, gelegentlich aber auch schon im November auf. Die kleinste Schwebstoffkonzentration bei Porte du Scex wurde am 28.2.1980 gemessen und betrug 0.3 mg/l . Da die Messungen nur zweimal wöchentlich und nur an Werktagen durchgeführt

werden, ist ein Vergleich der Jahre 1965-2003 mit dem natürlichen Zustand schwierig. Die vorliegenden Daten seit 1965 deuten darauf hin, dass in den Perioden 1975-1984 und 1995-2003 häufiger sehr kleine Konzentrationen gemessen wurden als davor und dazwischen.

Um die heutigen Messwerte mit dem natürlichen Zustand vergleichen zu können, wurde die gemessene Trübung mit Hilfe einer Schwebstoff-Trübe-Beziehung in die Schwebstoffkonzentration umgerechnet (Kapitel 3.1).

Aus den Abbildungen 4, 5 und 6 ist ersichtlich, dass 1904/05 relativ viele Konzentrationen klar unter den Werten von 2002/03 liegen. Auch die niedrigsten Konzentrationen, die immer sonntags (vom Nachmittag bis Mitternacht) auftreten, erreichen heute kein so tiefes Niveau mehr wie im natürlichen Zustand. Am längsten (über acht Tage mit nur kurzem Unterbruch) blieb der Schwebstoffgehalt in jüngerer Zeit vom 25.12.02 bis 2.1.03 auf einem tiefen Niveau (<20 mg/l). Würde die Konzentration allerdings mittels einer Schwebstoff-Abfluss-Beziehung berechnet, so ergäben sich gegenüber der hier verwendeten Methode auch für den aktuellen Zustand etwas mehr tiefe Werte (Kapitel 5.1).

2.3 Maximale Konzentrationen

Die zwei höchsten gemessenen Schwebstoffkonzentrationen in der Rhone betragen 7'526 mg/l am 12.10.1987 und 8'249 mg/l am 16.10.2000.

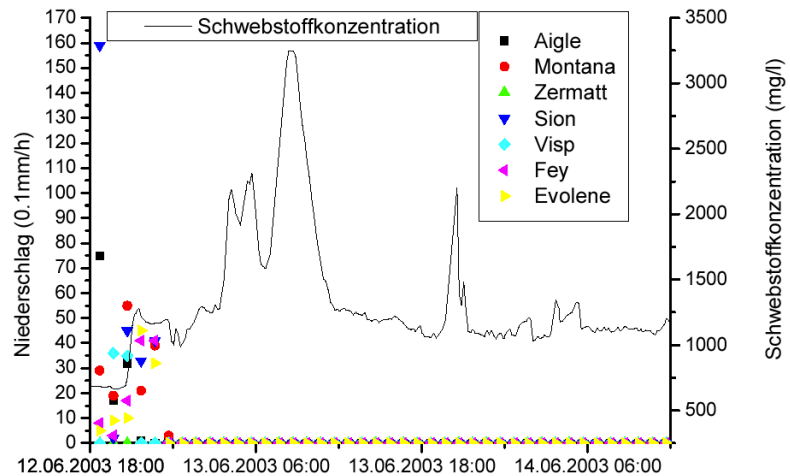


Abbildung 7: Darstellung der Schwebstoffkonzentration und des Niederschlags pro Stunde vom 12. Juni 2003 18:00 – 14. Juni 2003 12:00

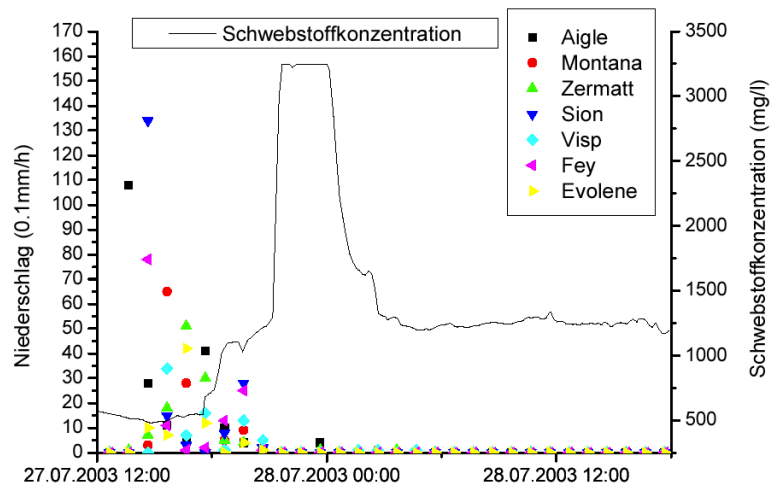


Abbildung 8: Darstellung der Schwebstoffkonzentration und des Niederschlags pro Stunde vom 27. Juli 2003 12⁰⁰ Uhr– 28. Juli 2003 18⁰⁰ Uhr. Werte über 3'264.7 mg/l (10'000 TEF) sind abgeschnitten (Erfassungsgrenze).

Die höchste Konzentration im Jahr 2003 wurde am 13. Juni mit 3'195 mg/l registriert. (auf die direkten Messungen bezogen, nicht auf die aus der Trübung oder dem Abfluss berechneten Werte). Der Konzentrationsverlauf der Schwebstoffe vor und nach dieser Spitze ist in Abbildung 7 dargestellt. Verursacht wurde die hohe Konzentration durch Niederschläge im Einzugsgebiet, die in der Region Sion mit 15.9 mm/h am stärksten waren. Die Schwebstoffführung der Rhone lag daraufhin genau 12h lang über 1'200 mg/l, die Spitzenwerte über 3'000 mg/l hielten jedoch nur 1h lang an. Diese Spitze trat ungefähr 14h nach dem starken Niederschlag

in Sion ein und ungefähr 8h nach dem Ende des Niederschlags an allen Orten.

Am 28. Juli wurde mit 1'455 mg/l die zweithöchste Schwebstoffkonzentration des Jahres 2003 gemessen, die ebenfalls auf Niederschläge im gesamten Einzugsgebiet zurückgeführt werden kann (Abbildung 8). Die stärksten Niederschläge fielen in Sion (13.4 mm/h) und in Aigle (10.8 mm/h). Die Konzentration an Schwebstoffen stieg für gut 20h über 1'200 mg/l an und lag für ca. 2¹/₂h über 3'000 mg/l. 7-8h nach den stärksten Niederschlägen in Aigle und Sion stieg die Schwebstoffkonzentration bei Porte du Scex erstmals über 3'000 mg/l, und 3¹/₂h nach den letzten nennenswerten Niederschlägen fiel sie wieder unter diesen Wert.

Insgesamt wurden für das Jahr 2003 an vier Tagen Konzentrationswerte >3'000 mg/l berechnet, wovon aber die Werte vom 15. und 17. Juni eher unrealistisch erscheinen ("Ausreisser", siehe Kapitel 3.2).

2.4 Schwall - Sunk

Während des Winters wird die Schwebstoffkonzentration in der Rhone hauptsächlich vom Kraftwerksbetrieb beeinflusst. In den Monaten Januar, Februar, März, November und Dezember ist der typische Wochenrhythmus der Stromproduktion am besten sichtbar, aber auch im April, September und Oktober ist er noch zu erkennen. Während der Sommermonate beeinflussen andere Faktoren, wie der Niederschlag, die Schnee- und Gletscherschmelze die Konzentration stärker. Die Abflussspitze liegt meist im Bereich von 180–240 m³/s und wird in Porte du Scex um Mitternacht erreicht. Oft kommt es, wie in Abbildung 8, 9 und 10 zu erkennen, schon am Nachmittag oder frühen Abend zwischen 15⁰⁰ und 19⁰⁰ Uhr zu einer ersten Spitze. Der Abfluss sinkt unter der Woche meistens zwischen 8⁰⁰ und 10⁰⁰ Uhr am tiefsten (70–110 m³/s), gelegentlich wird das Minimum auch noch früher am Morgen gemessen. Manchmal wird, wie in Abbildung 9 ersichtlich, in einem etwas weniger hohen Ausmass auch samstags turbinert. Die Abbildungen 10 und 11 hingegen zeigen für den Samstag nur sehr geringe Veränderungen im Abfluss, was auf einen stark reduzierten Kraftwerksbetrieb schliessen

lässt. Den Tiefstwert im Wochenverlauf erreicht die Schwebstoffkonzentration normalerweise in der Nacht von Sonntag auf Montag.

Die Schwebstoffkonzentration durchläuft ihr Maximum meistens etwa um dieselbe Zeit oder nur wenig später als der Abfluss. Das Minimum verzögert sich im Vergleich zum Abfluss aber um ca. 2 – 5h und die Konzentration steigt erst wieder an, wenn der Abfluss kurz nach Mittag bereits ein hohes Niveau erreicht hat (ca. 130–150 m³/s). Ein aussergewöhnliches Phänomen ist an einzelnen Werktagen in der Woche vom 8.-15.12.03 (Abbildung 11) besonders gut zu erkennen: Die Schwebstoffkonzentration geht beim ersten Abflussanstieg um die Mittagszeit erst einmal stark zurück, verhält sich also genau umgekehrt, als es aufgrund der C-Q-Beziehung eigentlich zu erwarten wäre (Kapitel 5.1). Grobe Auswertungen der Fließzeiten haben ergeben, dass es sich bei dieser ersten, in Porte du Scex eintreffenden Schwall-"Welle" um Wasser aus dem Speichersee Lac d'Emosson handeln muss, welches mit Schwebstoffgehalten von 3-5 mg/l ausserordentlich klar ist (Frey et al., 2003). Dieses Wasser wird in den zwei Zentralen Vernayaz und La Batiatz (flussabwärts von Martigny) turbinert und in die Rhone eingeleitet. Erst einige Stunden später folgen die Schwälle aus den beiden flussaufwärts von Martigny gelegenen, grossen Speicherkraftwerken Cleuson-Dixence und Mauvoisin "hintennach". Sie bringen grosse Mengen des sehr viel trüberen Wassers aus dem Lac des Dix und dem Lac de Mauvoisin (mit Schwebstoff-Konzentrationen von 60-80 mg/l; Frey et al., 2003), welches sich in Porte du Scex im Laufe des Nachmittags zunehmend bemerkbar macht. In der Folge wird, zwischen ca. 14⁰⁰ und 15⁰⁰ Uhr, das vorangegangene Aufklaren des Rhonewassers beendet; die Schwebstoffkonzentration nimmt bei weiter steigendem Abfluss sehr schnell zu und erreicht am Abend ihren täglichen Höchstwert.

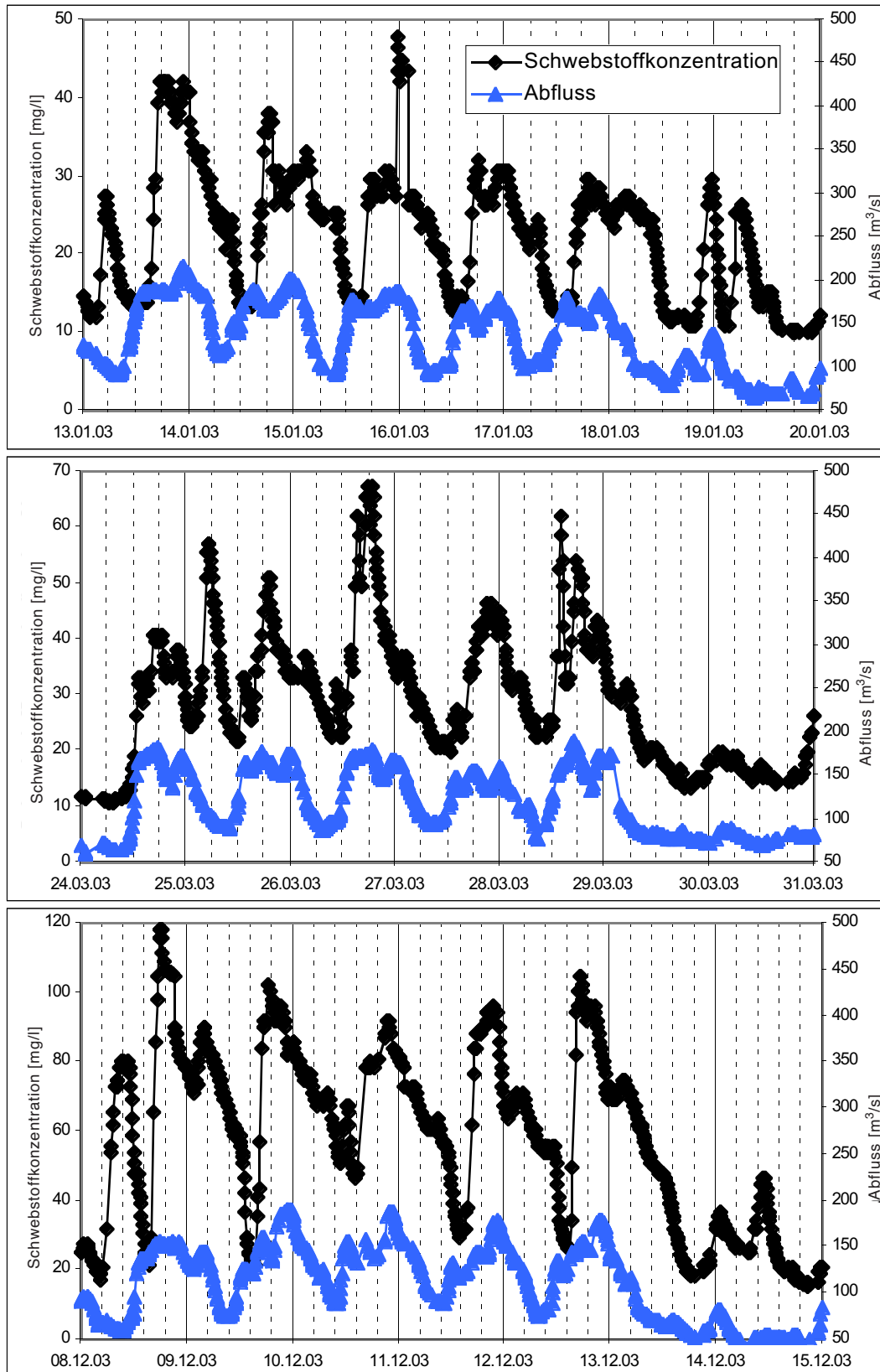


Abbildung 9, 10 und 11: Verschiedene Wochendarstellungen (jeweils Montag-Sonntag) der Schwebstoffkonzentration und des Abflusses im Jahr 2003. Beachte die unterschiedlichen Skalen der y-Achse.

3. Beziehung zwischen Schwebstoffen und Trübung

3.1 Berechnung der Schwebstofffracht

Die Fracht über ein Zeitintervall, t_0 bis t_1 , ergibt sich als Integral über den Schwebstofftransport $Q(t) \cdot C(t)$:

$$L = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) \cdot C(t) dt$$

wobei $Q(t)$ der Abfluss, und $C(t)$ die zeitabhängige Schwebstoffkonzentration ist. Da $C(t)$ nur 2-mal wöchentlich (also ca. 104-mal jährlich) gemessen wird, ergeben sich sehr hohe Ungenauigkeiten bei der Interpolation und der Hochrechnung auf Jahresfrachten. Als Alternative können seit 2002 die von der Landeshydrologie in der Rhone bei Porte du Scex quasi-kontinuierlich (d.h. alle 10min) gemessenen Werte der Trübung $Tr(t)$ in Schwebstoffkonzentrationen $C(t)$ umgerechnet werden (vgl. Kapitel 1.2).

Für das Jahr 2003 (genauer 4.11.02 bis 29.12.03) liegen 118 gleichzeitige Messungen der Trübung $Tr(t)$ (TEF) und der Schwebstoffkonzentration $C(t)$ vor (Abbildung 12, siehe auch Tabelle 2 im Anhang). Daraus wurde die folgende Parametrisierung $C(Tr)$ durch Kurvenanpassung („Methode der kleinsten Quadrate“)

bestimmt (Formel 1):

$$C(Tr(t)) = c_1 + c_2 \cdot Tr(t)^{c_3} \quad \text{für } Tr < 200 \text{ TEF}$$

mit $c_1 = 9.17 \pm 16.679 \text{ mg/l}$;

$c_2 = 0.046928 \pm 0.071704$;

$c_3 = 1.75371 \pm 0.29$

Formel 2:

$$C(Tr(t)) = c_1 + c_2 \cdot \ln(Tr(t)) + c_3 \cdot Tr(t) + c_4 \cdot Tr(t)^{c_5} \quad \text{für } Tr > 200 \text{ TEF:}$$

mit $c_1 = -2852.2 \pm 6597.1 \text{ mg/l}$;

$c_2 = 667.87 \pm 1513.5$; $c_3 = -1.2527 \pm 21.12$

$c_4 = 0.066047 \pm 4.3458$; $c_5 = 1.3192 \pm 5.3577$

wobei die Trübung Tr in TEF eingesetzt wird und die Schwebstoffkonzentration $C(Tr)$ in mg/l zu interpretieren ist (Abbildung 12).

Mit den Formeln 1 und 2 wurden die Schwebstoffkonzentrationen zu jedem Zeitpunkt (alle 10 Minuten) aus den Trübungsmessungen $Tr(t)$ berechnet. Mit dieser Parametrisierung $C(Tr)$ wurde der quasi-kontinuierliche Transport für jedes Zeitintervall Δt_i berechnet und aufintegriert. Die Jahresfracht ergibt sich dann aus

$$\hat{L} = \sum_i Q(t_i) \cdot C(Tr(t_i)) \cdot \Delta t_i$$

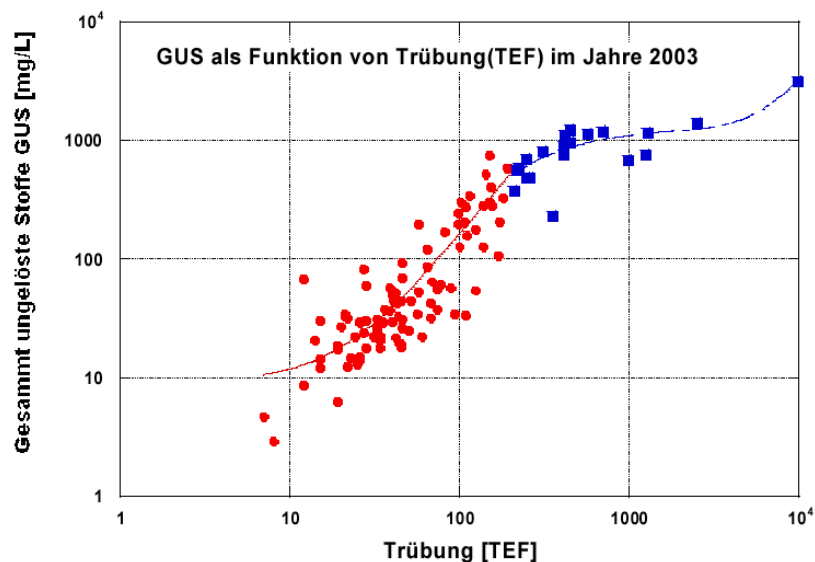


Abbildung 12: 118 simultan gemessene Schwebstoffkonzentrationen GUS (mg/l) und Trübungsmessungen Tr (TEF) wurden für die Parametrisierung verwendet. Rot: $Tr < 200$ TEF; blau: $Tr > 200$ TEF. Die angepassten Kurven (Linien) sind in den Formeln 1 und 2 definiert. Für die Regression wurden die Schwebstoffkonzentrationswerte vom 17.7.2003 nicht berücksichtigt, da der dazugehörige Trübewert als Ausreißer angesehen werden muss (für Werte siehe Anhang).

3.2 Ausreisser

Offensichtliche Ausreisser (unrealistisch hohe Werte, die nur während einer sehr kurzen Zeitspanne anhalten) traten im Jahr 2003 je einmal in den Monaten Januar und März, viermal im April, achtmal im Juli und zweimal im August auf (für Beispiele siehe Anhang). Das Überprüfen dieser Ausreisser mit den Niederschlagsmessungen oder den Abflusswerten bestätigte, dass es sich mit grösster Wahrscheinlichkeit um Fehlmessungen handelt. Sie wurden für die Berechnung der Schwebstofffracht entfernt.

Im Juni stiegen und fielen die Trübungswerte oft innerhalb kurzer Zeit um 5'000-9'000 TEF (ca.14mal), was einer Zunahme der Schwebstoffkonzentration von 1'000-2'500 mg/l entspricht (siehe Abbildung 2 im Anhang). Da nicht festzustellen ist, worauf diese kurzen Anstiege der Trübung zurückzuführen sind (Fehlmessungen, Entsanderspülungen, evt. örtlich bedingte Ereignisse oder andere unbekannte Gründe), sie aber im Juni so häufig vorkommen und die Trübung generell hoch ist, wurden sie in die Frachtberechnung miteinbezogen. Handelte es sich bei all diesen Werten um Fehlmessungen, die nicht zu berücksichtigen wären, würde die Monatsfracht vom Juni ungefähr 26 kt kleiner ausfallen. Zusätzlich kamen im Juni 12 eindeutige Ausreisser vor.

Die Ausreisser hätten die Berechnung des gesamten Schwebstofftransports des Jahres 2003 um 45 kt nach oben verfälscht.

4. Beschreibung des Schwebstofftransportes im Jahr 2003

Die Rhone transportierte im Jahr 2003 eine Schwebstofffracht von insgesamt 2'604'000 t oder 2'604 kt. Dieser Wert und alle weiteren Frachtwerte in diesem Kapitel wurden auf die in Kapitel 3.1 beschriebene Weise berechnet.

4.1 Verteilung nach Monaten / Jahreszeiten

In den Monaten Juni, Juli und August des Jahres 2003 transportierte die Rhone bei Porte du Scex eine Schwebstofffracht von 2'162 kt, was einem Anteil von 83% an der gesamten Jahresfracht 2003 entspricht. Werden zusätzlich noch die Monate Mai, September und Oktober dazugerechnet, was dann genau einer Jahreshälfte entspricht, beträgt der Anteil bereits 96%. Die Schwebstofffrachten der Wintermonate Januar, Februar, März, April, November und Dezember trugen gesamthaft nur gerade 106 kt zur Jahresfracht bei (d.h. ~4%). Dieser beträchtliche Unterschied zwischen den Monatsfrachten im Sommer und im Winter ist in Abbildung 13 deutlich zu sehen.

Für den Jahrestransport an Schwebstoffen in der Rhone ist also die Fracht der Wintermonate praktisch vernachlässigbar.

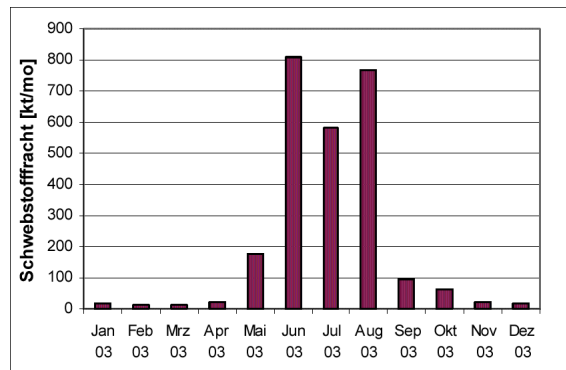


Abbildung 13: Monatliche Schwebstofffrachten der Rhone bei Porte du Scex Minimum: März (12 kt/mo); Maximum: Juni (809 kt/mo).

4.2 Verteilung nach einzelnen Tagen

Abbildung 14 zeigt die täglichen Schwebstofffrachten während der Wintermonate am Anfang des Jahres 2003. Der Einfluss der Turbinierung ist gut erkennbar, da in einem regelmässigen Abstand eine oder zwei Tagesfrachten (Samstag und Sonntag) viel geringer sind als die anderen. Der Unterschied zwischen den Wochentagen mit der höchsten und der kleinsten Fracht betrug während diesen Monaten durchschnittlich 685 t (nicht in die Berechnung einbezogen wurden die hohen Frachten von Anfang Januar und Ende April). Gegen Ende April erhöhten sich die Frachten stark und der Einfluss des Kraftwerkbetriebes war während dieser Zeit nicht mehr ersichtlich (siehe Abbildung 15). Die hohen Schwebstofffrachten im Sommer wurden, gleich wie die Konzentrationen, von den Niederschlägen, der Schnee- und Gletscherschmelze verursacht. Erst ab

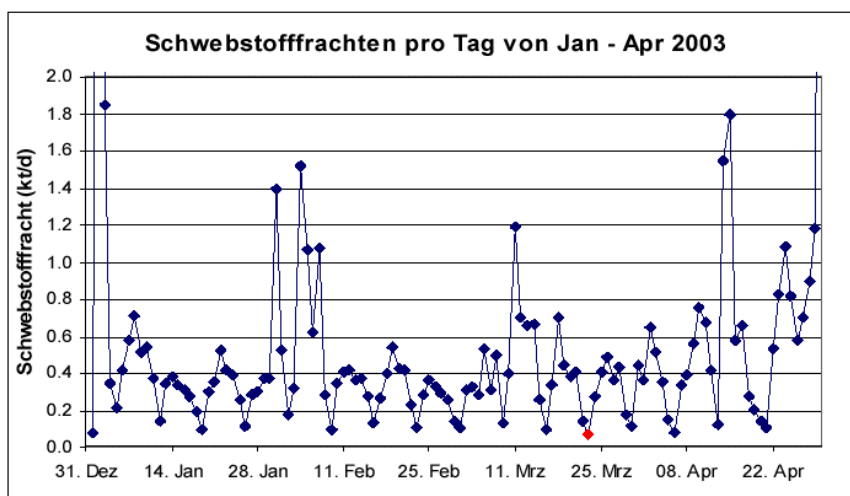


Abbildung 14: Darstellung der täglichen Schwebstofffrachten von Januar – April des Jahres 2003. Deutlich erkennbar ist der Wochenrhythmus mit dem Minimum am Sonntag. Minimum (rot): 23. März (0.07 kt/d).

Mitte Oktober bestimmte hauptsächlich wieder der Kraftwerksbetrieb den täglichen Schwebstofftransport, wobei der durchschnittliche Unterschied zwischen den Wochentagen mit der höchsten und der kleinsten Fracht gut 1 kt ergab (siehe Abbildung 16).

4.3. Besonderheiten im Jahr 2003

Aufgrund der ungewöhnlichen Wetterverhältnisse vor allem im Sommer 2003 (sehr heiss und nur wenige Gewitter) ist es interessant, die Auswirkungen dieser speziellen Situation auf den Schwebstofftransport zu untersuchen. Das Jahr 2003 zeichnete sich durch eine verhältnismässig hohe Schwebstofffracht aus, die aber nicht auf Hochwasser-Ereignisse (wie z.B. 1999 und 2000) zurückzuführen war. Im Juni führten die hohen Temperaturen zusammen mit einigen heftigen Niederschlägen zu starker Schneeschmelze, welche die ersten sehr hohen Frachten des Jahres zur Folge hatte. Im Juli war der grösste Teil des Schnees bereits geschmolzen, so dass der Schwebstofftransport nachliess. Mit den anhaltend hohen Temperaturen setzte dann gegen Ende Juli die Gletscherschmelze ein, worauf anschliessend eingegangen wird. Eine andere Besonderheit des Jahres 2003 zeigte sich im Winter, als das Was-

ser der Rhone laut Beobachtungen ungewöhnlich klar war.

Gletscherschmelze im August 2003

Der hohe Schwebstofftransport im August wurde zum einen von der starken Gletscherschmelze verursacht, die wiederum auf die ungewöhnlich hohen Temperaturen zurückging. In der zweiten Monatshälfte kam es dann zu einigen starken Niederschlägen, die eine hohe Fracht zur Folge hatten. Da es vom 1. – 13. August jedoch kaum regnete, kann für diese Zeitspanne die Einwirkung der hohen Temperatu-

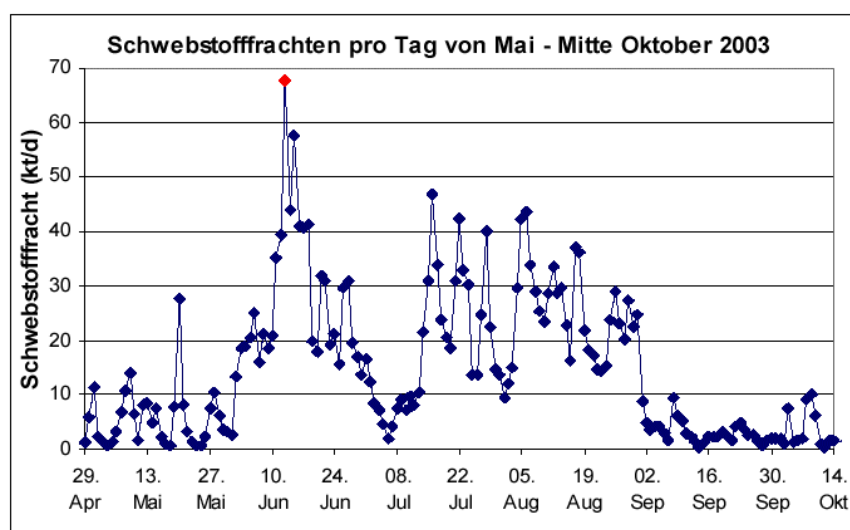


Abbildung 15: Darstellung der täglichen Schwebstofffrachten von Mai – Mitte Oktober. Maximum (rot): 13. Juni (68 kt/d).

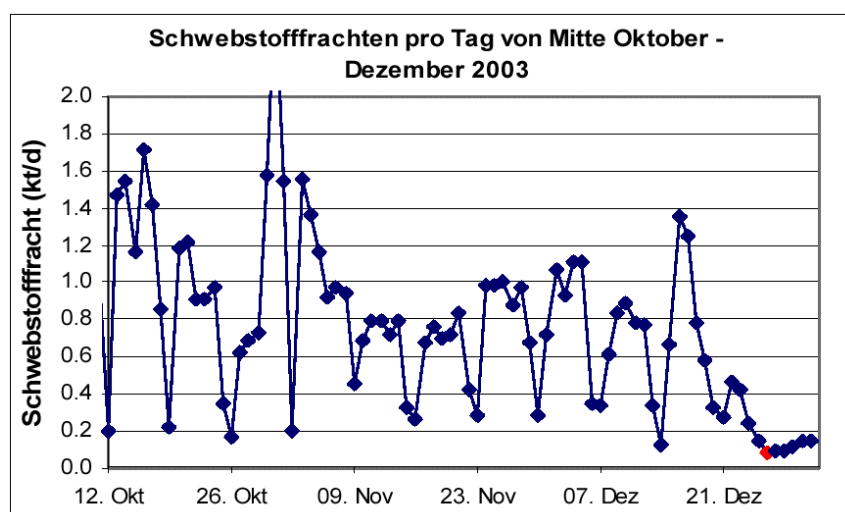


Abbildung 16: Darstellung der täglichen Schwebstofffrachten von Mitte Oktober – Dezember. Analog zu Abbildung 14 ist der Wochenrhythmus mit den Minima am Sonntag erkennbar. Minimum (rot): 26. Dezember (0.09 kt/d).

ren und der damit verbundenen Gletscherschmelze auf die Schwebstofffracht der Rhone gut verfolgt werden. In Abbildung 17 ist der Verlauf der Schwebstoffkonzentration im Vergleich zum Abfluss, zur Temperatur und zum Niederschlag dargestellt. Am 1. und 2. August stieg die Temperatur nicht und am 3. August nur leicht über 30°C (für genaue Temperaturen, siehe Tabelle 4 im Anhang). Deshalb blieb die Konzentration an diesen Tagen noch unter den Spitzenwerten, wie sie ab dem 4. August zu erkennen sind. Die Niederschläge an einigen Orten im Wallis erhöhten diese Spitzen am 5. und 6. August zusätzlich, doch der tägliche Rhythmus, verursacht vom Gletscherwasser, bleibt ersichtlich (Abbildung 17). In Porte du Scex erreichten die Konzentrationen am frühen Morgen den höchsten und am Abend (ca. 19⁰⁰ – 21⁰⁰ Uhr) den tiefsten Stand (siehe Abbildung 3 im Anhang). Das entspricht einer Verzögerung von mehr als 12h gegenüber den maximalen Lufttemperaturen, die jeweils zwischen 14⁰⁰ und 16⁰⁰ Uhr erreicht wurden.

Auffallend ist der Peak vom 12. August, als die Konzentration noch einmal deutlich höher stieg und auch länger auf diesem Niveau blieb. Der Grund dafür liegt wohl in der hohen Temperatur

des Vortages, die einen Spitzenwert von 34.7°C erreichte. Die ungewöhnlich hohe Temperatur dieses Tages verursachte insgesamt eine Schwebstofffracht von 36 kt/d (gemessen zwischen den Konzentrationsminima am Abend des 11. bzw. des 12. August).

Geringe Trübung im Winter

Um die Besonderheit des Winters 2002/03 aufzuzeigen, werden die Trübungswerte des darauf folgenden Winters zum Vergleich herangezogen. Leider sind im Februar 2004 aufgrund von Bauarbeiten die Trübungsmessungen ausgefallen, so dass nur die Monate Dezember und Januar verglichen werden können. Betrachtet man in der Abbildung 18 vorerst nur den Verlauf der Trübung, bestätigt dies die Beobachtung, dass die Rhone im Winter 2002/03 speziell klares Wasser führte. Vor allem im Dezember und Ende Januar ist der Unterschied gut zu sehen. Im Winter 2002/03 betrug die kleinsten gemessenen Trübungswerte im Dezember 6 und im Januar 5 TEF, während im folgenden Winter im Dezember mit 12 und im Januar mit 11 TEF die tiefsten Werte registriert wurden. Die durchschnittliche Trübung im Dezember 2002 lag mit 36 TEF um 14 TEF tiefer als

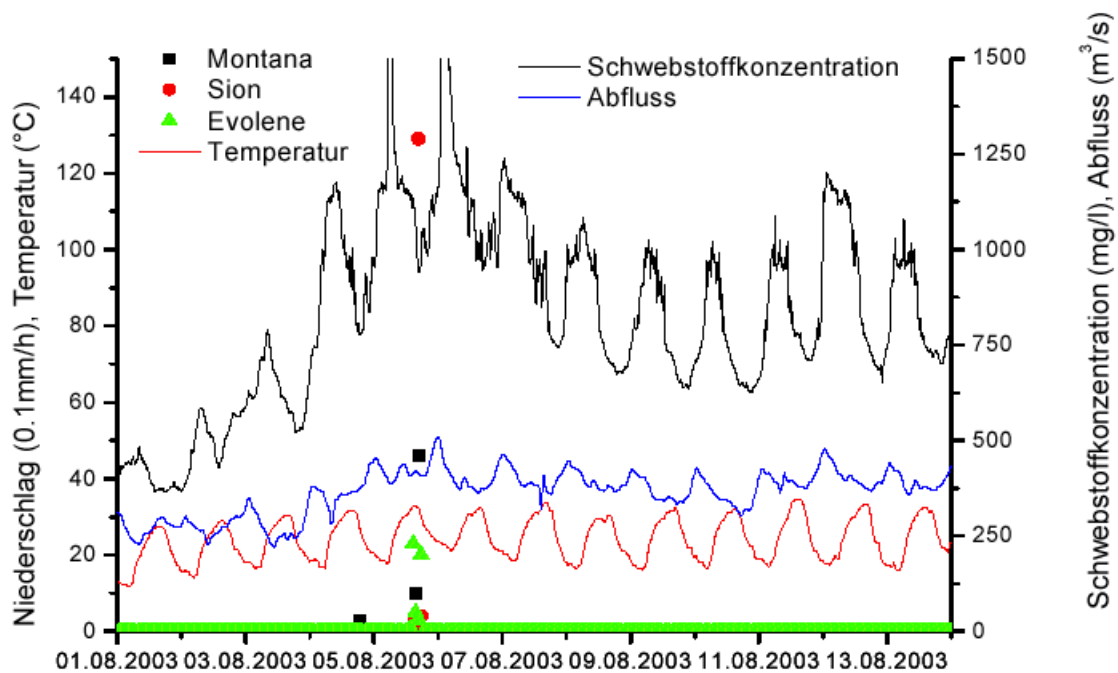


Abbildung 17: Darstellung der Schwebstoffkonzentration und des Abflusses der Rhone bei Porte du Scex vom 1.8.2003 – 13.8.2003, dem Tagesverlauf der Lufttemperatur in Aigle und dem Niederschlag pro Stunde im Einzugsgebiet der Rhone.

ein Jahr später. Erstaunlich ist die Tatsache, dass der Abfluss, der in Abbildung 18 ebenfalls dargestellt ist, im "klaren" Winter 2002/03 allgemein höher war als ein Jahr später. Dies widerspricht der allgemeinen Tendenz zu zunehmender Trübung (bzw. Schwebstoffkonzentration) bei steigendem Abfluss (Abbildung 19). Dieses ungewöhnliche Aufklaren der Rhone könnte auf einer verstärkten Exfiltration von klarem Grundwasser in den Fluss beruhen. Darauf deuten zumindest die aussergewöhnlich hohen Grundwasserstände hin, die in der Rhone-Ebene v.a. flussabwärts von

Martigny (abgeschwächt aber auch zwischen Sion und Martigny) nach den starken Niederschlägen von Anfang November 2002 über den ganzen Winter bis zum Frühjahr 2003 herrschten (LHG, 2003; verschiedene Grundwasser-Messstationen). Einen weiteren Hinweis auf einen erhöhten Grundwasser-Zustrom in die Rhone liefert auch die Tatsache, dass in den regelmässigen Stichproben der NADUF-Messstation Port du Scex im Winter 2002/03 erhöhte Frachten der Parameter Sulfat, Alkalinität und Silikat festgestellt wurden (vgl. Schürch, 2000).

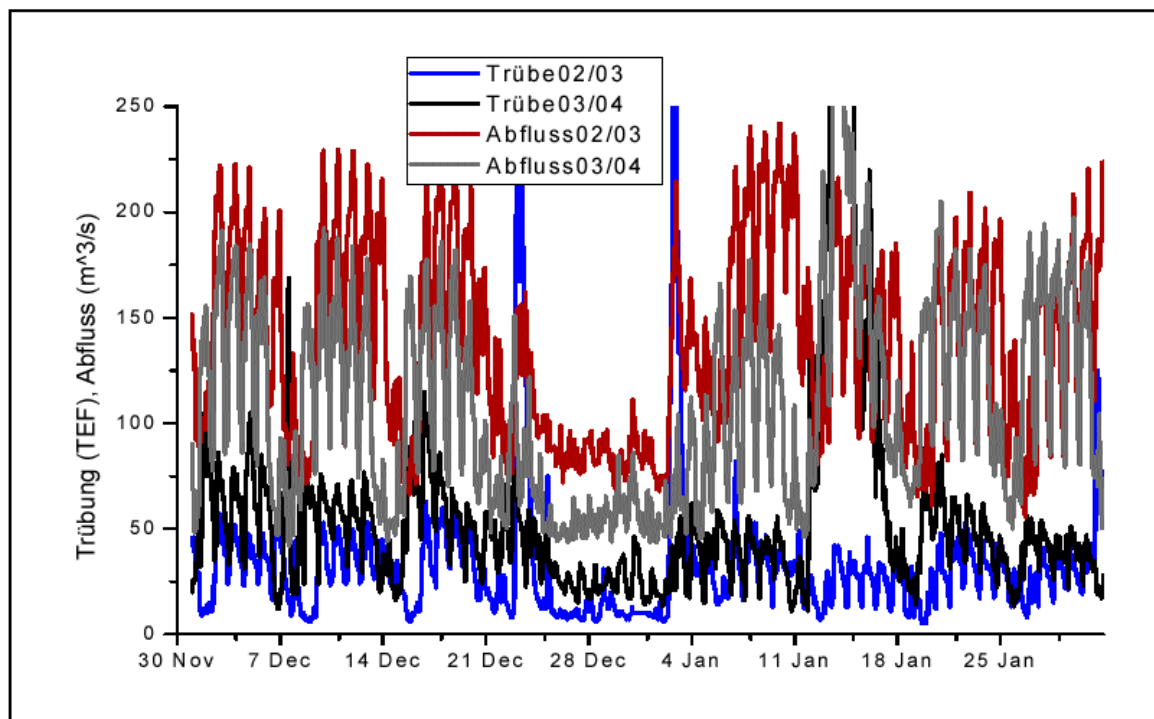


Abbildung 18: Darstellung der Abflusswerte und der Trübung von Dezember und Januar der Winter 2002/03 und 2003/04.

5. Vergleich der Schwebstofffracht 2003 mit früheren Jahren

5.1 Verschiedene Methoden zur Berechnung der Schwebstofffracht

Wie bereits erwähnt, ergibt die in Kapitel 3.1 beschriebene Methode 1 zur Berechnung der Schwebstofffracht mit Hilfe von kontinuierlichen Trübungsmessungen (C-TEF Beziehung; Tabelle 1) für das Jahr 2003 eine Gesamtfracht von 2'604 kt. Da jedoch erst seit November 2002 kontinuierliche Trübungsmessungen durchgeführt werden (Kapitel 1), sind die Vergleichsdaten der Schwebstofffrachten von 1965-2002 mit Hilfe des kontinuierlich gemessenen Abflusses berechnet worden (C-Q Beziehung) Wird die Schwebstoffkonzentration mit einer C-Q Beziehung über 10 Jahre (1995-2003) berechnet (Methode 2; Tabelle 1 und Abbildung 19) und mit diesen Werten die Fracht ermittelt, so ergibt sich für das Jahr 2003 ein Schwebstofftransport von 1'961 kt. Das sind 643 kt oder fast 25% weniger, als mit Methode 1 erhalten wurden (siehe oben). Werden für die C-Q Beziehung nur die Messwerte des Jahres 2003 berücksichtigt (Methode 3), liegt die Jahresfracht mit 1'792 kt noch tiefer, was einer Abweichung gegenüber Methode 1 von mehr als 30% entspricht.

Wie sich diese Unterschiede auf die einzelnen Monate auswirken, zeigen die Abbildungen 20 und 21. Mit Ausnahme von Januar, Februar und März sind die Schwebstofffrachten der Berechnungsmethoden 2 und 3 deutlich kleiner (siehe Tabelle 5 im Anhang). Prozentual sind im Juni die Ab-

weichungen am geringsten, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass die Schwebstofffracht in diesem Monat vor allem von hohen, durch Niederschläge und Schneeschmelze bedingten Abflüssen verursacht wurde. Im Oktober und im November sind die Abweichungen am höchsten (58–73%), vermutlich weil der Abfluss schon auf einem tiefen "winterlichem" Niveau, die Trübung aber noch immer hoch war. Der Grund für die höhere Trübung lässt sich jedoch aus den vorliegenden Daten nicht

Tabelle 1: Vergleich der C-TEF und C-Q Beziehungen. Einzelheiten siehe Text.

Methode	Grundlage	Zeitraum Datenwerte	Bemerkungen
1	C-TEF Beziehung	2002/ 2003	Kapitel 2.1
2	C-Q Beziehung	1995 - 2003	Abbildung 18
3	C-Q Beziehung	2003	Abbildung 18

ermitteln. Die im Vergleich zum November und Dezember hohen Frachten im Januar und Februar widersprechen nur scheinbar den Beobachtungen, wonach die Rhone im Winter 2002/03 sehr klar gewesen war; weil die mit Methode 2 und 3 berechneten Frachten auf den Abflusswerten beruhen, führen sie in diesem speziellen Fall zu falschen (weil zu hohen) Werten.

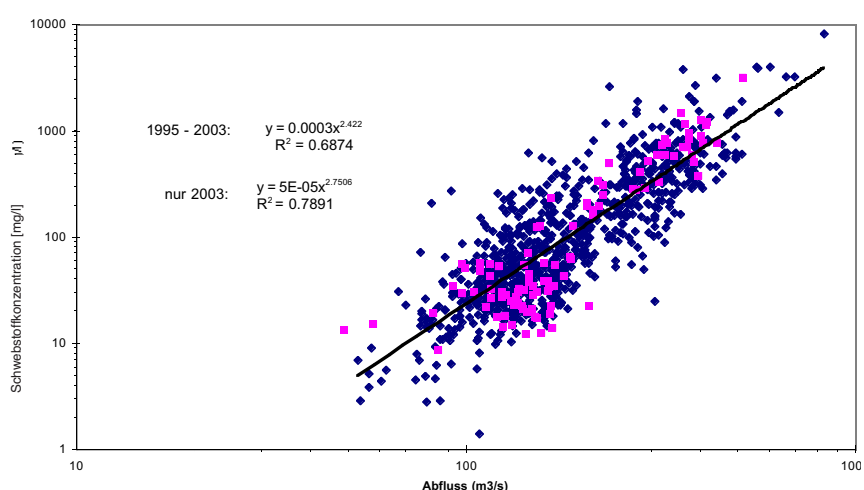


Abbildung 19: Beziehungen zwischen der Schwebstoffkonzentration und dem Abfluss (C-Q Beziehungen) für die Periode 1995 - 2003 (Methode 2, blaue Punkte) sowie nur für das Jahr 2003 (Methode 3, rote Punkte). Zu Einzelheiten der Methoden siehe Tabelle 1 und Text.

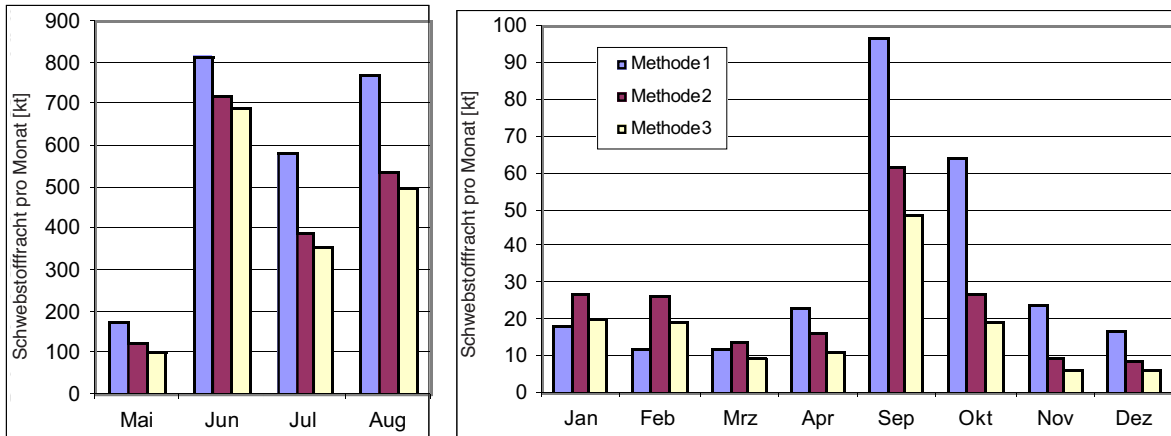


Abbildung 20 und 21: Vergleich der nach verschiedenen Methoden berechneten monatlichen Schwebstofffrachten des Jahres 2003. Beachte die unterschiedlichen Skalen der y-Achse.

In Abbildung 22 zeigen die Summenkurven der verschiedenen Methoden, dass bei kleinen Frachten die grössten Unterschiede zwischen den einzelnen Berechnungsmethoden resultieren. Es ist auch erkennbar, dass die Tages-schwebstofffrachten der zweiten Methode im Bereich von ca. 350 - 1'200 t/d mit den Resultaten der ersten Methode übereinstimmen.

Für die Vergleiche mit den Jahren 1965 – 2002 werden im Folgenden die Resultate der C-Q Beziehung (Methode 2) verwendet, auf der alle Schwebstofffrachten dieser Jahre beruhen. Für den Vergleich mit den natürlichen Bedingungen von 1904/05 wird hingegen auf die aus den Trübungswerten berechneten Frachten (Methode 3) zurückgegriffen, welche realistischer scheinen.

5.2 Vergleich mit den natürlichen Bedingungen von 1904/05

Winter

Im Winter sind die Schwebstofffrachten allgemein relativ gering. Aus Abbildung 23 geht aber deutlich hervor, dass der Schwebstofftransport der Rhone im Winter vor hundert Jahren wesentlich kleiner war als heute. Damals betrug die Schwebstofffracht in den Monaten November – Februar zum Teil deutlich weniger als 5 kt/mo, während sie im Jahr 2003 zwischen 10 und 20 kt/mo lag (Ausnahme November). Der Einfluss der Speicherkraftwerke, die mehrheitlich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstanden, schlägt sich also in den Wintermo-

naten sehr deutlich in einem höheren Schwebstofftransport niedriger. Im Januar 2003 ist ein Niederschlagsereignis anfangs des Monats für den relativ hohen Monatswert verantwortlich. Während der restlichen Januartage war die Schwebstofffracht ähnlich gering wie in den darauf folgenden Monaten. Der Schwebstofftransport vom März 2003 kommt dem des Jahres 1905 am nächsten, die Differenz beträgt aber immer noch 3.7 kt. Dies entspricht einer um 47% höheren Fracht als unter den natürlichen Bedingungen im März 1905. Im Januar

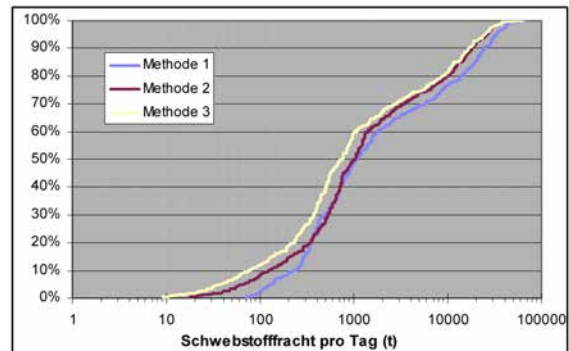


Abbildung 22: Summenkurve der berechneten Schwebstofffrachten pro Tag des Jahres 2003.

2003 liegt die Monatsfracht um 363%, im Februar um 982%, im November 1217% und im Dezember um 682% über dem jeweiligen Wert von 1904/05. Gemessen am langjährigen Mittel der Periode 1981-1999 liegen die Monatsfrachten von 2003 im November, Dezember und Januar etwas zu hoch, im Februar und März dagegen deutlich zu tief (Abbildung 23).

Auch in der Darstellung der Tagesfrachten während des Winters (Abbildung 24) wird der Unterschied zwischen 1904/05 und 2002/2003 ersichtlich, der eindeutig auf die Kraftwerke zurückzuführen ist. Die Tagesfrachten von 1904/05 verlaufen auf natürliche, unregelmässige Weise, während 2002/03 vom Wochenrhythmus bestimmt ist. Durchschnittlich transportierte die Rhone vor hundert Jahren von Dezember bis März eine Schwebstofffracht von 132 kt pro Tag. Dieser Wert wäre ohne die letzten vier Tage im März, als die Fracht wahrscheinlich aufgrund starker Regenfälle stark anstieg, mit 76 kt noch deutlich kleiner. In denselben Monaten des Jahres 2003 betrug die durchschnittliche Tagesfracht hingegen 478 kt. In der Zeit von Mitte Februar bis ungefähr Mitte März, als die Tagesfrachten von 1905 durchgehend sehr tief blieben, sanken auch die niedrigsten, an Sonntagen erfassten Werte von 2003 nie bis auf ein vergleichbares Niveau ab. Der im Hochwinter natürlicherweise oft vorherrschende, sehr geringe Schwebstofftransport wird heute demnach aufgrund des Kraftwerkbetriebes praktisch ständig und teilweise stark überschritten.

Sommer

Abbildung 25 zeigt, dass die Schwebstofffrachten des Sommers 1904 viel höher sind als die durchschnittlichen Frachten der Jahre 1981-1999. Erst in den Monaten September und Oktober fallen die Frachten von 1904 wieder unter die Mittelwerte von 1981-1999. Unter natürlichen Bedingungen war der Schwebstofftransport im Sommer wohl grösser als heute. Dieser Unterschied ist auf die Kraftwerke zurückzuführen, die in den abflussreichen Sommermonaten viel Wasser zurückhalten und so die Schwebstofffracht verringern. Die Monate Juni und August des Jahres 2003 bil-

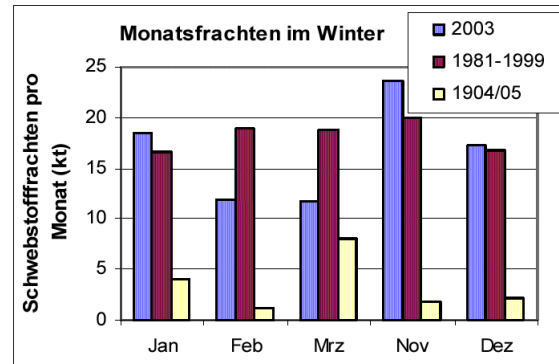


Abbildung 23: Vergleich der Schwebstofffrachten in kt/mo der Wintermonate des Jahres 2003 mit dem Winter 1904/05. Die ebenfalls aufgeführten, durchschnittlichen Frachten für 1981-1999 stammen aus dem hydrologischen Jahrbuch 1999 und wurden nach abweichenden Methoden bestimmt.

deten allerdings eine Ausnahme, war die Monatsfracht im Juni doch ungefähr gleich hoch wie 1904 und jene im August sogar um 130 kt (oder umgerechnet ca. 20%) höher. Dies ist mit grösster Wahrscheinlichkeit auf die ungewöhnlichen Bedingungen des "Hitzesommers" 2003 zurückzuführen. Obwohl beim Verlauf der täglichen Schwebstofffrachten im Sommer nicht mehr direkt ersichtlich (vergleiche Kapitel 4.2), ist der Einfluss der Kraftwerke unter normalen Bedingungen auch im Sommer vorhanden. Auch wenn sich die Monatsfrachten im Juni der Jahre 2003 und 1904 nicht deutlich unterscheiden, wird in den maximalen Tagesfrachten von

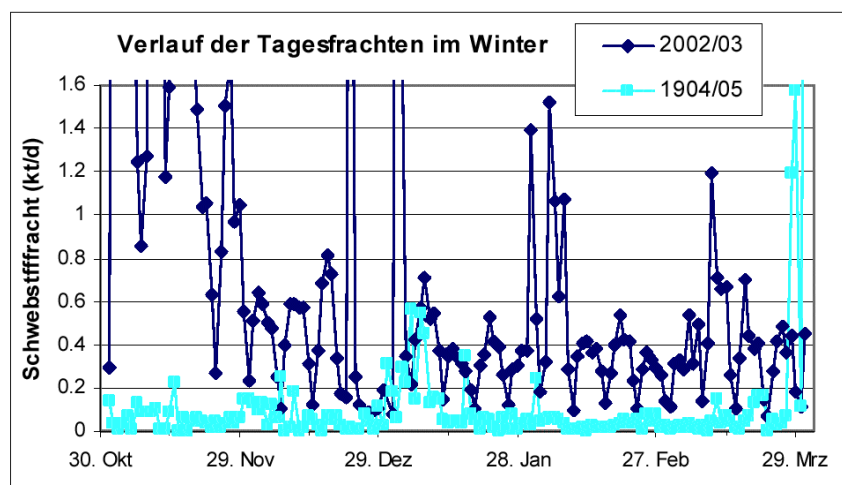


Abbildung 24: Vergleich der täglichen Schwebstofffrachten in den Wintern 2002/03 und 1904/05. Minimum 1904/05: 17. Dezember (0.3 t/d oder umgerechnet 0.003 kt/d); Minimum 2002/03: 23. März (71 t/d oder 0.071 kt/d).

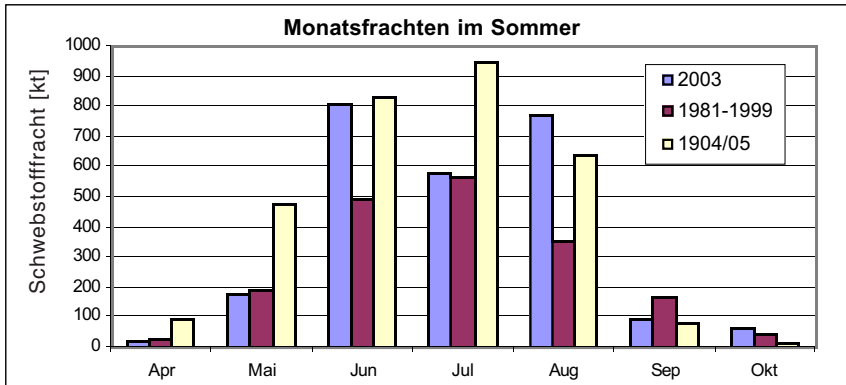


Abbildung 25: Vergleich der Schwebstofffracht in kt/mo der Sommermonate 2003 und 1904. Die ebenfalls aufgeführten, durchschnittlichen Frachten für 1981-1999 wurden dem hydrologischen Jahrbuch 1999 entnommen (andere Methode zur Berechnung des Schwebstofftransportes).

Abbildung 26 ein Unterschied erkennbar. Im Jahr 1904 gab es fast doppelt so viele Tage mit Schwebstofffrachten über 40 kt/d als im Jahr 2003. Ohne Einfluss der Kraftwerke kam es unter natürlichen Bedingungen also zu einzelnen sehr hohen Tagesfrachten, während heute die höchsten Tagesfrachten tiefer liegen, aber allgemein länger anhalten.

5.3 Vergleich mit den Jahren 2000-2002

Im Vergleich mit den drei vorhergehenden Jahren fallen die monatlichen Schwebstofffrachten des Jahres 2003 (mit Hilfe des Abflusses berechnet) nicht besonders auf, wie den Abbildun-

5.4 Entwicklung der monatlichen Schwebstofffrachten

In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass sich die durchschnittliche monatliche Schwebstofffracht der 1990er Jahre gegenüber dem Mittel von 1965-81 und 1981-89 in den Wintermonaten (Januar, Februar, November, Dezember) erhöht hat. Genau gleich verhält es sich in den Monaten Mai und September. In all diesen Monaten scheint der Trend seit Messbeginn in Richtung immer höherer Frachten zu führen (ausgenommen im November mit einem Rückgang der Fracht in den 1980er Jahren). Dies stimmt aber nicht gut mit der Entwicklung der Schwebstoffkonzentrationen überein (vgl. Kapitel 2.1) und könnte deshalb auch vorwiegend eine Zunahme der mittleren Tagesabflüsse wiedergeben (welche ja den Frachten für diese Periode zugrunde liegen). In den Monaten April, Juli, August und Oktober sanken die Monatsmittel der 1990er Jahre wieder auf oder unter das Niveau von 1965-81, während sie in den 1980er Jahren darüber lagen.

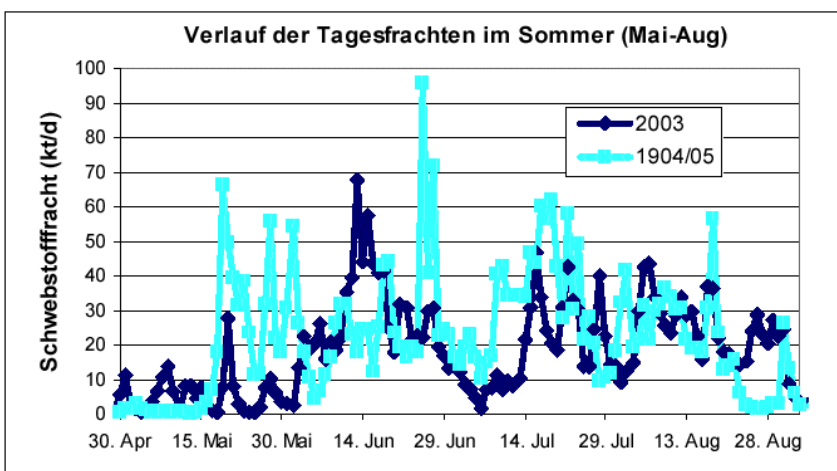


Abbildung 26: Vergleich der Schwebstofffrachten pro Tag während der Monate Mai – August der Jahre 2003 und 1904. Maximum 1904: 25. Juni (96 kt/d); Maximum 2003: 13. Juni (68 kt/d).

Bei den monatlichen Schwebstofffrachten des Jahres 2003 fallen in Abbildung 29 v.a. die Monate Juni und August auf, in denen zwei Berechnungsmethoden unabhängig voneinander deutlich höhere Werte ergeben als im Durchschnitt früherer Jahre.

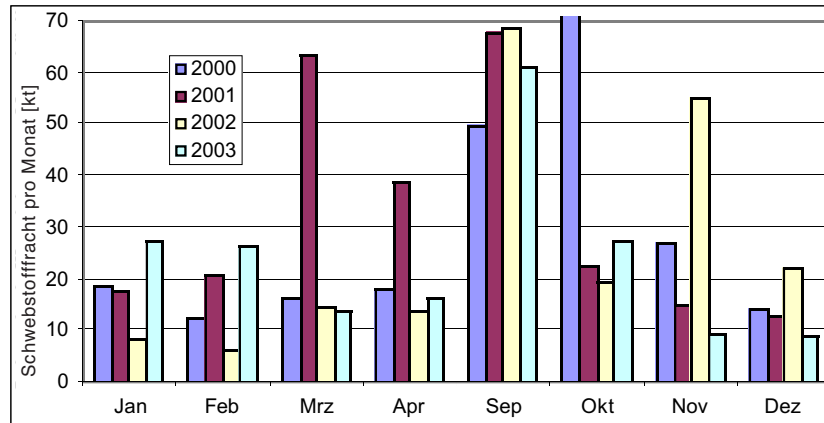
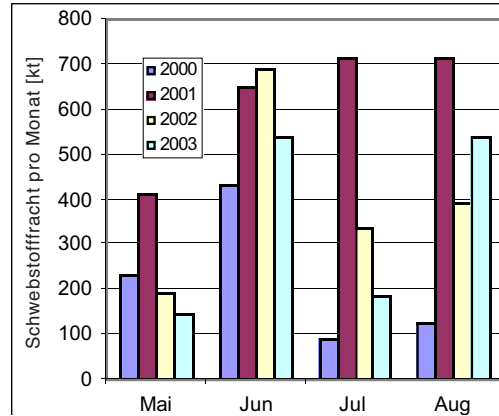


Abbildung 27 und 28: Vergleich der monatlichen Schwebstofffrachten des Jahres 2003 mit den Jahren 2000-2002. Alle Frachten dieser Abbildung wurden mit Hilfe einer C-Q-Beziehung für die Jahre 1995-2003 berechnet (Methode 2). Beachte die unterschiedlichen Skalen der y-Achse.

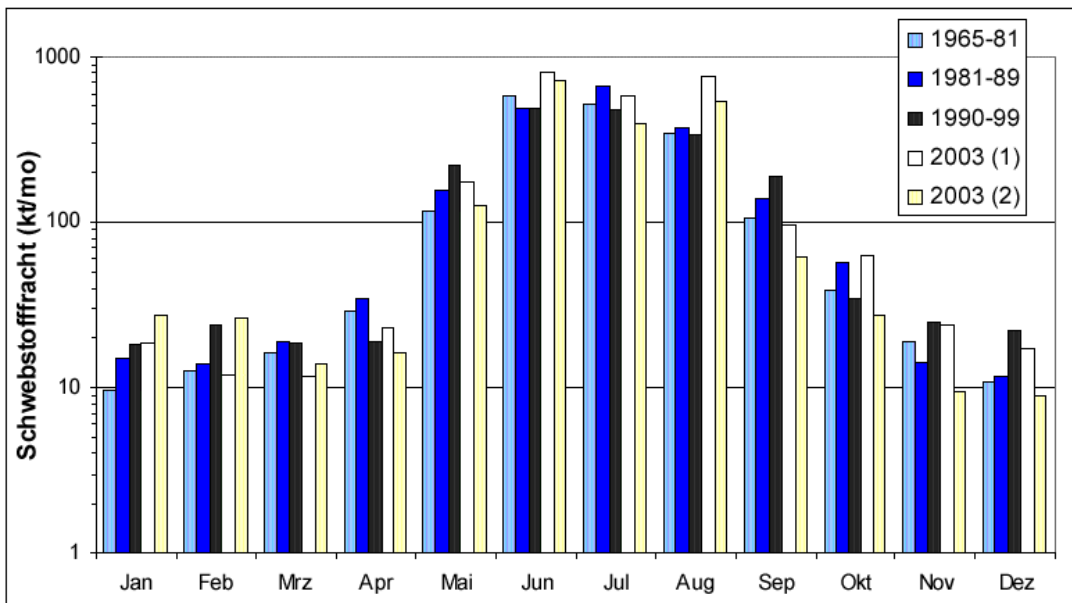


Abbildung 29: Vergleich der durchschnittlichen Monatsfrachten von 1965-81, 1981-89, 1990-99 und der monatlichen Schwebstofffrachten von 2003. (1) bedeutet mit der Methode 1 berechnet, (2) mit der Methode 2 (Kapitel 5.1).

6. Ökologische Auswirkungen der veränderten Trübeverhältnisse

Zu den Auswirkungen der im Wasser suspendierten Schwebstoffe (= GUS für gesamte ungelöste Stoffe oder SS für Suspended Solids) sowie der durch die Schwebstoffe bewirkten Wassertrübung existiert eine umfangreiche Literatur. Dabei werden teilweise auch die suspendierten und die (vorübergehend) auf der Gewässersohle abgelagerten Schwebstoff-Anteile gemeinsam behandelt (= SABS für Suspended and Bedded Sediments). Zusammenfassende Darstellungen finden sich z.B. in ARGE Limnex, Schälchli, & Abegg (1997), DFO (2000) oder Berry et al. (2003). Als wie schwerwiegend die Auswirkungen einer bestimmten Schwebstoff-Konzentration bzw. Trübung beurteilt werden, ist dabei von zahlreichen Randbedingungen abhängig (z.B. Art der Schwebstoffe, Art des Gewässers, Art der betroffenen Organismen). Weitgehende Einigkeit besteht darüber, dass für eine gesamthafte Beurteilung v.a. zwei Kriterien massgebend sind:

- Die Zeitspanne, während der eine bestimmte Schwebstoff-Konzentration bzw. Trübung herrscht (Einwirkungsdauer);
- Das Verhältnis oder die Differenz zur natürlichen Konzentration bzw. Trübung, die an dieser Stelle und in diesem Zeitraum ohne anthropogene Einflüsse herrschen würde.

Diese beiden "pauschalen" Kriterien werden auch bei der gesamthafte Beurteilung von gewässerökologischen Auswirkungen der Trübeverhältnisse in der Rhone berücksichtigt (Kapitel 6.1). Diese Betrachtungen beruhen zur Hauptsache auf den vergleichsweise gut untersuchten, direkten Effekten der Trübung auf Fische (mechanische Schädigung, physiologische Beeinträchtigung; z.B. Petz-Glechner et al., 1999). Weniger gut bekannt, aber für das ganze Ökosystem ebenso entscheidend sein können indirekte Effekte und Auswirkungen auf andere Organismengruppen. Dazu zählen nach ARGE Limnex, Schälchli & Abegg (1997), ARGE Trübung Alpenrhein (2001) sowie Bucher (2002) etwa:

- Eine Verminderung der Produktivität auf allen Stufen der Nahrungskette (Primärproduzenten, Primär- und Sekundärkonsumenten);

- Der Verlust oder die Beeinträchtigung von Lebensräumen (Habitaten), i.B. von Laicharealen der Fische, durch Ablagerung von Feinsedimenten (Versiltung, Kolmation);
- Ein geringerer Fortpflanzungserfolg von Fischen und Makroinvertebraten durch erhöhte Sterblichkeitsraten oder durch verzögerte Entwicklung von Eiern und Larven im Sediment-Lückenraum;
- Eine Veränderung des Bewegungs- und Wanderungsverhaltens der Fische;
- Eine Verringerung des Nahrungsangebotes für Fische.

Als Beispiel für eine indirekte Auswirkung wird in Kapitel 6.2 der Einfluss der Trübung auf den pflanzlichen Bewuchs der Gewässersohle über den "Umweg" des Lichtangebotes in der Rhone näher untersucht.

6.1 Gesamthafte Beurteilung

Die Auswirkungen von künstlich erhöhten Schwebstoffkonzentrationen auf aquatische Organismen können entweder absolut oder relativ zu einer natürlichen Basiskonzentration ("Background") beurteilt werden. Beim absoluten Ansatz wiederum kann entweder die effektiv herrschende (gemessene) Endkonzentration oder "nur" die anthropogen bedingte Konzentrationserhöhung (Δ) betrachtet werden.

Unter diesen verschiedenen Ansätzen hat sich in jüngerer Zeit v.a. derjenige von Newcombe & Jensen (1996) durchgesetzt, der die (absolute) Höhe der Schwebstoffkonzentration und die Einwirkungsdauer auf der Grundlage von zahlreichen Felduntersuchungen und Laborexperimenten zu einem "Stress-Index" verrechnet. An diesem Index kann anhand einer abgestuften Skala die Wirkung auf Fische bestimmt werden, wobei zwischen verschiedenen Fischgruppen (z.B. "adult Salmonids", "juvenile Salmonids" oder "Nonsalmonids") sowie unterschiedlichen Arten von Effekten unterschieden wird (z.B. "behaviorial", "sublethal" und "para-lethal effects"). Dieser "dose-response"-Ansatz ist in Abbildung 30 stark schematisiert dargestellt. Die darin angegebenen Trübungseinheiten

(NTU) entsprechen grundsätzlich den in der Rhone gemessenen Einheiten (TEF); weil aber das Verhältnis von Trübungswerten aus verschiedenen Messungen sowohl unter sich als auch gegenüber der Schwebstoffkonzentration von vielen Faktoren beeinflusst wird (z.B. Typ der Trübungssonde, Art der Schwebstoffe), können diese Werte nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. In erster, sehr grober Näherung wird hier davon ausgegangen, dass Schwebstoffkonzentration (in mg/l) gerade etwa der Trübung in NTU (vgl. Caux et al., 1997)

bzw. in TEF entspricht (vgl. Abbildung 12 des vorliegenden Berichtes).

In der Rhone herrschen während des Sommers natürlicherweise Schwebstoffkonzentrationen von ca. 50 mg/l bis zu mehreren 100 mg/l vor (Kapitel 2.1), nach Niederschlägen oder in Perioden mit ausserordentlich starker Schnee- und Gletscherschmelze können diese Werte auch über mehrere Tage auf >500 mg/l ansteigen (mit Spitzen von 1'000 bis mehreren 1'000 mg/l; Kapitel 2.3 und 4.3). Was aus den ursprünglichen, durchwegs auf die Schwebstoffkonzentrationen

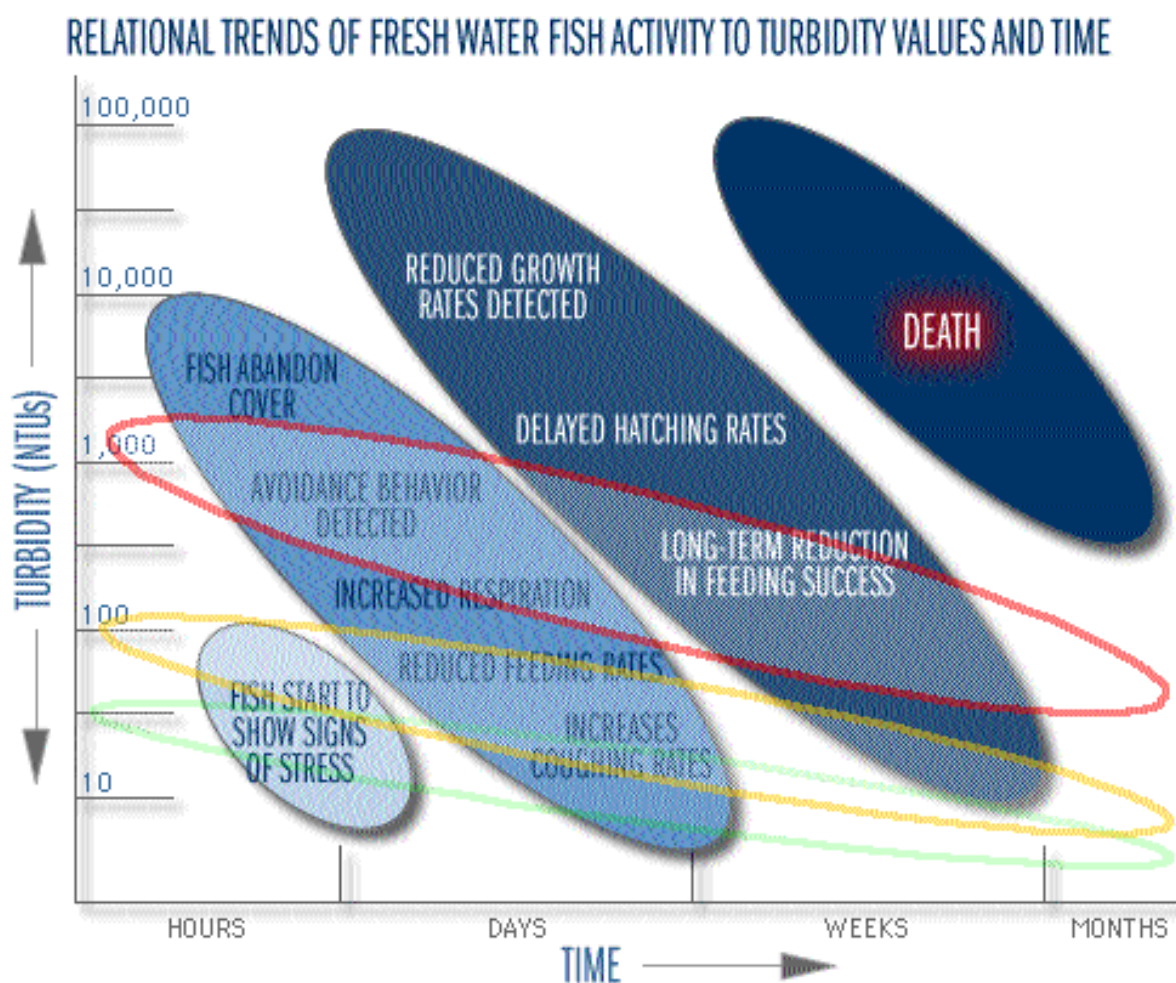


Abbildung 30. Schematische Darstellung der Effekte zunehmender Trübung (in NTU-Einheiten: $NTU \sim TEF$) und zunehmender Einwirkungsdauer auf Fische. Die blauen Ellipsen bezeichnen die verallgemeinerten, dosisabhängigen Reaktionen der Fische, berechnet nach Newcombe & Jensen (1996). Darstellung übernommen aus Berry et al. (2003). Die übrigen Ellipsen umgrenzen ungefähr die Einwirkungsbereiche der Trübung in der Rhone bei Porte du Scex zu verschiedenen Jahreszeiten und Perioden: Rot = Sommersituation heute (entspricht auch ungefähr der natürlichen Sommersituation); Gelb = Wintersituation heute (mit Schwalleinfluss); Grün = Wintersituation vor ca. 1950 (ohne Schwalleinfluss). Hinweis: In Rhonestrecken flussaufwärts von Riddes (Einmündung des Betriebswassers aus den grossen Speicherkraftwerken Cleuson-Dixence und Mauvoisin) liegen die winterlichen Trübungswerte und damit auch die Einwirkungsbereiche heute tiefer als in Porte du Scex (siehe z.B. die Werte bei Leuk in Kapitel 6.2).

tration bezogenen Angaben von Necombe & Jensen (1996) abzuleiten ist, wird in Abbildung 30 sinngemäss dargestellt: Bei diesen sommerlichen Konzentrationsbereichen in der Rhone ist bei juvenilen und adulten Salmoniden (Forellen) mit starken Effekten zu rechnen (z.B. verminderte Wachstumsraten, reduzierte Fischdichten, u.U. auch erhöhte Mortalität). Wie Abbildung 30 ebenfalls illustriert, verändern sich die Effekte bei steigender Trübung bzw. Einwirkungsdauer allmählich, eine kritische Grenze kann deshalb für keinen dieser beiden Einflussfaktoren angegeben werden.

Andere Beurteilungsansätze bestätigen, dass die (natürlicherweise) hohe Trübung der Rhone im Sommer gewässerökologisch sehr relevant ist: Die auf europäische Fliessgewässer und auf chemisch inerte Feststoffe (= mineralische Schwebstoffe) bezogenen Kriterien der EIFAC (1965) gehen für den Konzentrationsbereich von 80 – 400 mg/l von beträchtlichen, für den Bereich >400 mg/l von grossen gewässerökologischen und fischereiwirtschaftlichen Folgen aus. In DFO (2000) ist die Gefährdung ("risk") von Fischen und ihrem Lebensraum in Abhängigkeit der Schwebstoff-Zunahme (ΔC) diskutiert. Wäre die stark zunehmende Schwebstoffführung in der Rhone während des Sommers (gegenüber dem Winter) anthropogen bedingt, so müsste sie aufgrund dieser Kriterien als starke ("high risk"; $\Delta C = 200 - 400$ mg/l) oder gar übermässige Gefährdung des Ökosystems ("unacceptable risk", $\Delta C > 400$ mg/l) eingestuft werden.

Im Winterhalbjahr liegen die Schwebstoff-Konzentrationen in der Rhone heute mit ca. 10 bis maximal 100 mg/l fast um eine Grössenordnung unter den Sommerwerten und damit in einem gewässerökologisch noch unkritischen Bereich. Dies äussert sich darin, dass für diesen Bereich nach allen erwähnten Ansätzen nur eine vergleichsweise geringe Beeinflussung bzw. Gefährdung von aquatischen Organismen erwartet wird. Das gilt grundsätzlich auch dann noch, wenn man statt der absoluten Schwebstoffkonzentration deren ebenfalls absolute Zunahme (ΔC) gegenüber den natürlichen Winterwerten betrachtet, wie sie in der Rhone etwa 1904/05 gemessen worden sind (Kapitel 5.2). Es zeigt sich aber bereits hier, dass der ursprünglich vorherrschende, winterliche Konzen-

trationsbereich (wenige mg/l bis ca. 30 mg/l) tendenziell noch weniger schädliche Auswirkungen zeitigt als die heute gemessenen Werte (vgl. Abbildung 30). Die EIFAC (1965) hat den Konzentrations-Bereich von 0 – 25 mg/l denn auch separat ausgewiesen und als fischereilich unproblematisch beurteilt ("no evidence for any harmful effects"). In Kanada wird vorgeschlagen, bei derart geringen Ausgangswerten ("clear water") eine Zunahme der Schwebstoffkonzentration von maximal 25 mg/l über kurze Zeit (24h) bzw. von 5 mg/l über längere Zeit zu tolerieren (Caux et al., 1997).

In einer Mehrheit von US-Bundesstaaten und in Kanada wird ausserdem eine (relative) Zunahme der Trübung bzw. der Schwebstoffkonzentration von maximal 10% bis 20% über den jeweiligen natürlichen Background hinaus als zulässig erachtet (Bruton, 1985; Caux et al., 1997; EPA, 2003). Wie in Kapitel 5.2 ausgeführt, liegen die Schwebstoffkonzentrationen und -frachten in der Rhone heute selbst bei Niedrigwasser an Winterwochenenden ständig und mit einem ΔC von meist >5 mg/l eindeutig über dem natürlichen Background. Während des werktäglichen Schwallbetriebes steigen die Werte nochmals um ein Vielfaches an und liegen dann weitaus höher als der Background. Es gilt daher für die Rhone in ähnlicher – wenn vielleicht auch etwas weniger ausgeprägter – Weise, wie es in ARGE Limnex, Schälchli & Abegg (1997) schon für den Alpenrhein festgestellt wurde:

“Unter unbeeinflussten Verhältnissen wäre der Alpenrhein im Winter durch ständige Niederwasserführung, ein monatelanges "Klarwasserstadium" und eine dementsprechend stabile Zusammensetzung der Sedimente ("Bettruhe") geprägt. Die Lebensgemeinschaft des Flusses hat sich im Laufe eines langen evolutiven Prozesses an diese stabilen winterlichen Verhältnisse adaptiert.”

6.2 Das Lichtklima als Beispiel für eine indirekte Auswirkung

Die Verminderung des Lichtangebotes wird nur in Ausnahmefällen zur Beurteilung der Schwebstoffkonzentration bzw. der Trübung in Oberflächengewässern herangezogen (z.B. in ein-

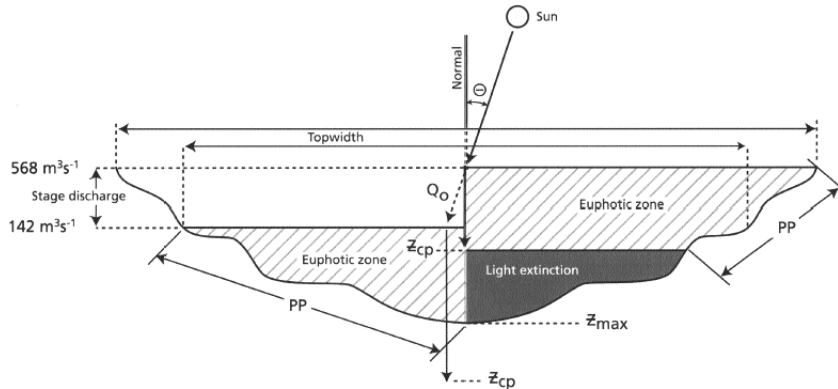


Abbildung 31. Schematische Darstellung des Lichtklimas in einem Flussquerschnitt bei unterschiedlichem Abfluss bzw. Wasserstand ("stage discharge"). "Euphotic zone" = Ausreichend belichtete Zone oberhalb der aktuellen euphotischen Tiefe z_{cp} ($= z_{EU}$), in der noch 1% der Lichtintensität an der Wasseroberfläche herrscht. Auf dem Flussgrund innerhalb dieser Zone wird ein Nettowachstum von Pflanzen (v.a. Algen), d.h. eine Netto-Primärproduktion ("PP") noch als möglich erachtet. "Light extinction" = dunkle Zone, in der keine Primärproduktion mehr stattfindet. Abbildung aus Yard (2003), Wiedergabe autorisiert.

dem natürlichen Zustand ist daher mit zunehmender Tiefe eine Abnahme der maximal möglichen Bewuchsdichte und eine Beschränkung auf weniger lichtbedürftige Arten zu erwarten. Das verbleibende Lichtangebot sollte aber auch in den tiefsten Bereichen der Flusssohle noch für einen minimalen Algenbewuchs ausreichen.

Abbildung 31 zeigt schematisch die Auswirkungen erhöhter Trübung auf

einzelnen US-Bundesstaaten; EPA, 2003). Für den Alpenrhein haben Messungen und Berechnungen des Lichtangebotes in Abhängigkeit der Trübung zu folgendem Schluss geführt (Limnex, 2001; ARGE Trübung Alpenrhein, 2001):

einen Flussquerschnitt. Als Grenze der produktiven Wasserschicht, innerhalb derer noch ein Netto-Wachstum (d.h. eine positive Photosynthese-Bilanz) der Primärproduzenten möglich ist, wird dabei i.A. die sogenannte euphotische Tiefe (z_{EU}) mit noch 1% der Oberflächen-Lichtintensität betrachtet. In den bisher untersuchten alpinen Gewässern, die vorwiegend

Die winterlichen Abfluss- und Trübungsverhältnisse im Alpenrhein wirken sich limitierend auf den pflanzlichen Bewuchs der Flusssohle (Phytobenthos) aus. Unter natürlichen Verhältnissen, wie sie an einzelnen Wochenenden auch heute noch annähernd herrschen, führte der Rhein im Winter meist konstant tiefe Mengen an recht klarem Wasser. Bei Schwall bewirkt der Anstieg des Wasserstandes und der Trübung im Rhein selbst oder in seinen Zuflüssen ein insgesamt vermindertes Lichtangebot, was wiederum eine geringere Produktivität des Phytobenthos zur Folge hat. Gegenüber

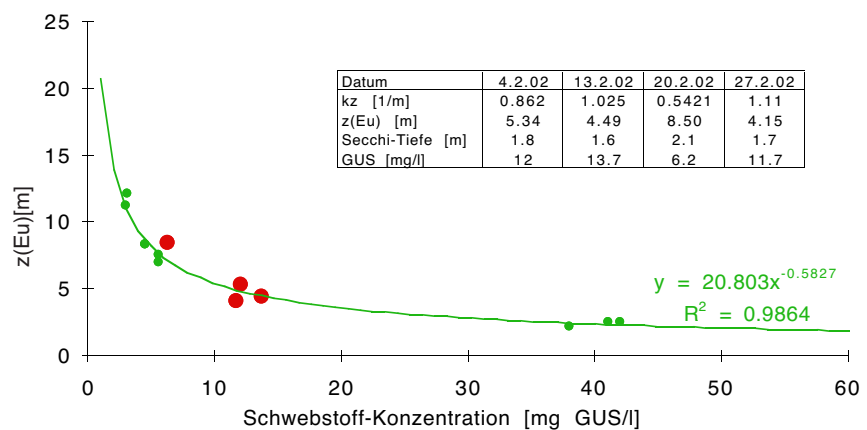


Abbildung 32. Beziehung zwischen euphotischer Tiefe (z_{EU}) und Schwebstoff-Konzentration (Trockengewicht) aus Messungen im Stauraum Reichenau des Alpenrheins (grüne Punkte und Regressionskurve) sowie Messungen im Stau Susten der Rhone (rote Punkte). Die Messungen im Alpenrhein stammen aus den Wintern 1999 und 2001 (Limnex, 2001), jene in der Rhone vom Februar 2002. Die in der Rhone aufgenommenen Kennwerte des Lichtklimas (kz , z_{EU}), der Sichttiefe nach Secchi und der Schwebstoffkonzentration sind in der eingefügten Tabelle angegeben. GUS = gesamte ungelöste Stoffe, kz = vertikaler Extinktionskoeffizient. Für nähere Angaben siehe Text und Limnex (2001).

durch mineralische Schwebstoffe (Gesteinsabrieb) getrübt werden, ist z_{EU} auf recht ähnliche Weise vom Schwebstoffgehalt des Wassers abhängig (Limnex, 2001). In Abbildung 32 ist diese Beziehung für den Alpenrhein dargestellt. Im Stauraum Susten der Rhone wurden im Rahmen von Subprojekt I-6 des Rhone-Thur Projektes (Baumann, 2004) während des Februars 2002 insgesamt vier Vertikalmessungen der Lichtintensität, der Sichttiefe und der Schwebstoffkonzentration durchgeführt (Abbildung 32). Die zugehörigen Mess- und Auswertungsmethoden sind in Limnex (2001) beschrieben.

Die wenigen Messpunkte in der Rhone lagen sehr nahe bei den Beziehungen zwischen Lichtklima und Schwebstoffgehalt, wie sie für den Alpenrhein ermittelt worden waren (Abbildung 32). Diese Beziehungen wurden deshalb auch verwendet, um das Lichtklima in der Rhone für andere als die gemessenen Situationen abschätzen zu können. Das betrifft besonders die relativ hohen Schwebstoffkonzentrationen im Unterlauf, wie sie heute während des winterlichen Schwall herrschen (Kapitel 2.4 und 5.2).

Das Lichtklima wurde für zwei Querprofile der Rhone bei Leuk und Riddes berechnet. Die eingesetzten Schwebstoffkonzentrationen richten sich in Leuk nach den Werten bei Sunk und bei Schwall, wie sie an dieser Stelle bei einer Probenahme vom 25. – 27.1.2002 erfasst worden sind (Abbildung 1). In Riddes wurden typische winterliche Tiefst- und Höchstwerte aus den Messungen in der Rhone bei Porte du Scex eingesetzt (Kapitel 2.4). Gestützt darauf kann das Lichtklima in der Rhone wie folgt beschrie-

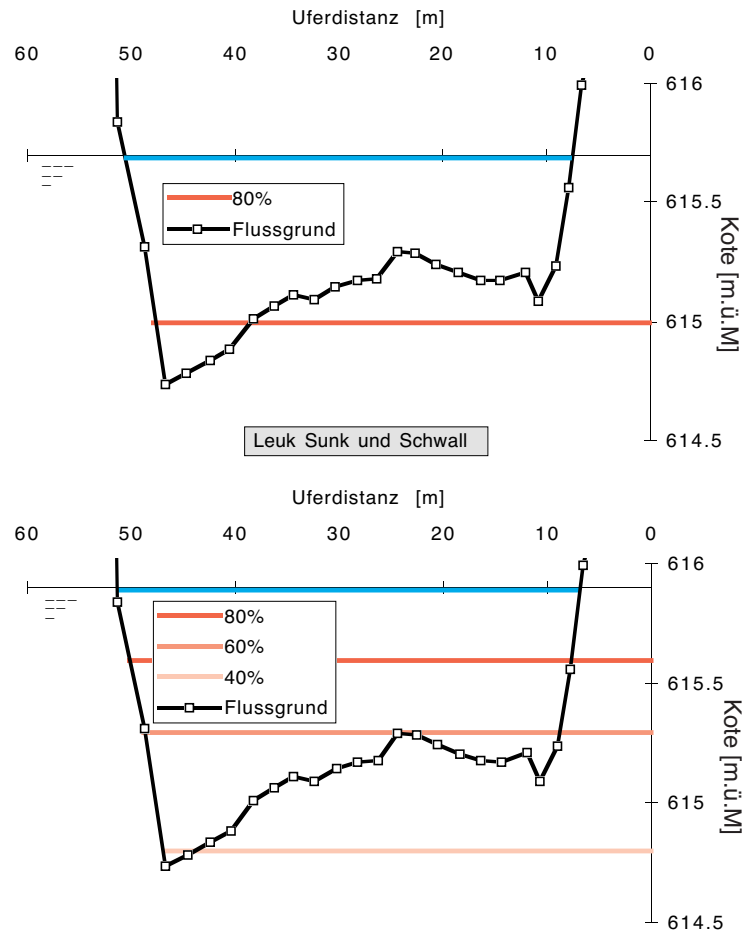


Abbildung 33. Auswirkungen der winterlichen Trübung auf das Lichtklima in der Rhone bei Leuk. Dargestellt ist jeweils derselbe Flussquerschnitt bei Sunk (oberes Bild) und bei Schwall (unteres Bild). Darin eingetragen sind einzelne Ebenen mit unterschiedlicher Lichtintensität (in % des Oberflächenwertes). Die Querprofile und die Wasserspiegel-Lagen stammen aus den Berechnungen der EPFL Lausanne mittels des hydraulischen Modells HEC-RAS (LCH, 2002).

ben werden (Abbildungen 33 und 34):

- Im Querprofil Leuk steigt der Wasserspiegel im Winter von Sunk zu Schwall um 20 cm, und der Schwebstoffgehalt wird von 2 mg/l auf 10 mg/l erhöht. Dies führt zu einer deutlich stärkeren Lichtabnahme (Extinktion) mit der Wassertiefe; bei Sunk sind an der tiefsten Stelle des Profils noch knapp 80% jener Lichtintensität zu erwarten, die an der Wasseroberfläche herrscht (I_0). Bei Schwall sinkt dieser Anteil auf 40%. Bei beiden winterlichen Abflusszuständen liegt also die gesamte Flussole noch innerhalb der ausreichend belichteten, euphotischen Zone (Abbildung 31) und böte somit geeignete

Voraussetzungen für ein mehr oder weniger starkes Wachstum der Primärproduzenten (auch unter Berücksichtigung des tieferen I_0 im Winter, siehe unten). Dass im Querprofil Leuk im Winter 2002 dennoch nur ein minimaler, hauptsächlich auf einen schmalen Uferstreifen beschränkter Algenbewuchs festgestellt wurde, ist deshalb kaum auf mangelndes Lichtangebot als Folge der schwallbedingten Trübung zurückzuführen. Es ist vielmehr anzunehmen, dass der Bewuchs in der Rhone bei Leuk, wie im Alpenrhein auch (ARGE Trübung Alpenrhein, 2001), v.a. durch die hohe (und bei Schwall noch zusätzlich steigende) mechanische Beanspruchung der Sohle begrenzt wird ("hydraulischer Stress"; Baumann, 2004).

- Im Querprofil Riddes wurden die Eckwerte der Schwebstoffkonzentration im Winter mit 10 mg/l bei Sunk und 75 mg/l bei Schwall festgesetzt. Bei Sunk resultiert an der tiefsten Stelle des Profils noch eine Lichtintensität von ca. 50% des Oberflächenwertes I_0 ; bei Schwall liegt der Wasserspiegel ca. 1m höher, und die Lichtintensität auf der Sohle sinkt bis auf 1% von I_0 , also ziemlich genau bis zur kritischen (relativen) Grenze für die Primärproduzenten. Unter diesen Grenzbedingungen können Einflussfaktoren wie die Jahreszeit (d.h. die Intensität der Sonneneinstrahlung) oder die Tageszeit des Schwalledurchganges (d.h. die Zeit der höchsten Trübung) eine entscheidende Rolle spielen. Mittels langjähriger meteorologischer Daten von Sion (Messreihe

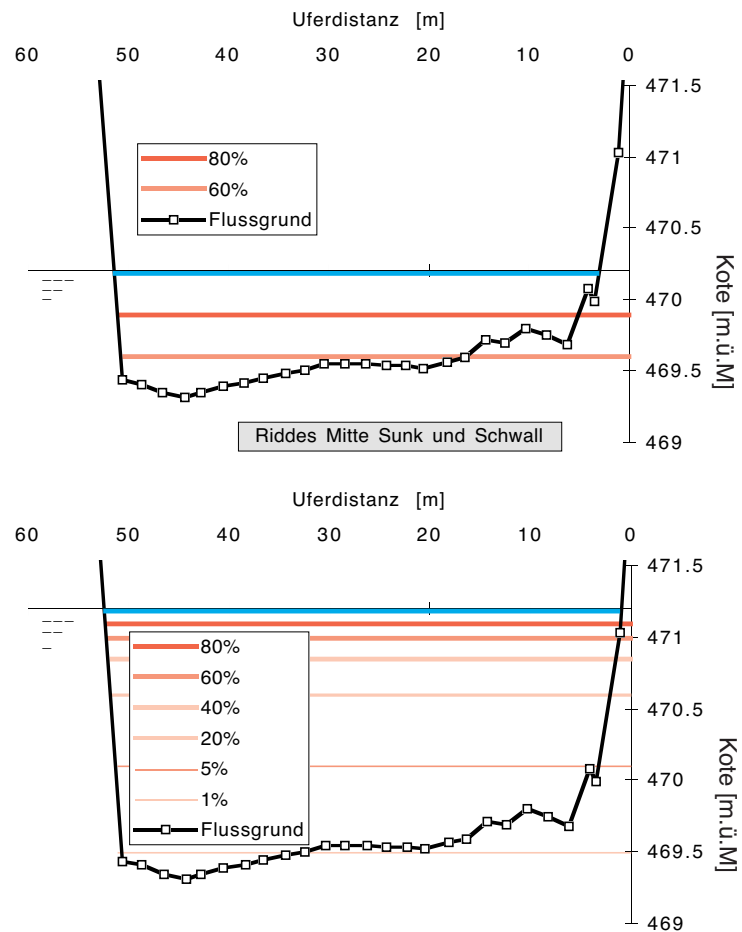


Abbildung 34. Auswirkungen der winterlichen Trübung auf das Lichtklima in der Rhone bei Riddes Mitte. Dargestellt ist jeweils derselbe Flussquerschnitt bei Sunk (oberes Bild) und bei Schwall (unteres Bild). Darin eingetragen sind einzelne Ebenen mit unterschiedlicher Lichtintensität (in % des Oberflächenwertes). Die Querprofile und die Wasserspiegel-Lagen stammen aus den Berechnungen der EPFL Lausanne mittels des hydraulischen Modells HEC-RAS (LCH, 2002).

1981 – 2000; SMA, 2004) sowie einiger Kennwerte und Umrechnungsfaktoren (Limnux, 2001) wurde daher für die Rhone in Riddes die während der Wintermonate Dezember bis Januar effektiv im Gewässer eintreffende Lichtmenge grob abgeschätzt. Es zeigte sich, dass zu dieser Zeit für die Primärproduzenten unmittelbar unter der Wasseroberfläche mit ca. 22 W/m^2 oder umgerechnet ca. $100 \mu\text{E/m}^2\text{s}$ eine ähnliche mittlere Energie- bzw. Strahlungs-"Menge" verfügbar ist wie beispielsweise im Alpenrhein bei Chur (Limnux, 2001). Dieser Ausgangswert nimmt bei in der Rhone bei Riddes unter Schwalleinfluss aber aufgrund der

höheren Trübung mit der Tiefe schneller ab als im Alpenrhein und erreicht schon ca. 0.5 – 1m über der Sohle den kritischen (absoluten) Bereich von 5 – 20 $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$. Unterhalb dieses Bereiches, der im Winter ca. 5 – 10% von I_0 entspricht, ist normalerweise kein Nettowachstum von Primärproduzenten mehr nachzuweisen (Limnex, 2001 und Referenzen darin). Noch nicht berücksichtigt ist dabei allerdings, dass an Wochenenden kein oder nur ein reduzierter Schwallbetrieb herrscht und dass der werktägliche Schwall flussabwärts von Martigny mit zunehmender Distanz von den grossen Kraftwerken Cleuson-Dixence, Mauvoisin und Emosson immer später eintrifft. Vor der Mündung in den Lac Léman, bei Porte du Scex, ist deshalb auch unter der Woche zumindest ein grosser Teil des Vormittags noch von den verhältnismässig klaren Sunkverhältnissen geprägt – und zeitweise vom noch klareren "Schwallwasser" aus dem Lad d'Emosson (Kapitel 2.4). Es ist aufgrund der wenigen vorliegenden Messungen und groben Auswertungen somit nicht eindeutig zu entscheiden, ob (und gegebenenfalls wo genau) im Unterlauf der Rhone die für den Algenbewuchs ausreichend belichtete euphotische Zone die gesamte Flusssohle umfasst (einschliesslich der tieferen Stellen). Fest steht zumindest, dass die Aufnahmen im Winter 2002 in zwei Querprofilen bei Riddes praktisch bis in die maximale Wassertiefe schwache Anzeichen von Kieselalgenbewuchs ergeben haben (Baumann, 2004). Unter den Kieselalgen befinden sich auch Arten, die noch bei ausserordentlich gerin-

gem Lichtangebot überleben können (Limnex, 2001). Wesentlich lichtbedürftiger sind demgegenüber die Grünalgen, deren Verbreitung in der Rhone auf die äussersten Uferstreifen beschränkt ist (siehe Titelbild). Auch dabei spielt allerdings, wie schon für das Querprofil Leuk ausgeführt (siehe oben), der hydraulische Stress eine mindestens so grosse Rolle wie die Lichtverhältnisse.

Die theoretische (relative) untere Grenze für die euphotische Zone bei 1% von I_0 ist demnach nur für die typischen Werte der Einstrahlung im Sommer massgebend, die in Sion aufgrund des höheren Sonnenstandes und der längeren Tage ca. 3 bis 5 mal über den Winterwerten liegen.

Im Hochsommer (Juni bis August) liegt der Wasserspiegel der Rhone nochmals um ca. 1.0 – 1.5m höher als beim winterlichem Schwall. Zudem nimmt, als Folge der starken Schnee- und Gletscherschmelze, auch die Schwebstoffkonzentration auf Werte von mehreren 100 mg/l zu (Kapitel 6.1). Unter diesen (für den Sommer natürlichen) Bedingungen wird auch die im Jahresverlauf maximale Einstrahlung von den Schwebstoffen sehr rasch "ausgelöscht": Die euphotische Zone bleibt auf die oberste Wasserschicht von 0.5 – 1.0 m Tiefe beschränkt. Während des Hochsommers ist ein Wachstum von Primärproduzenten (v.a. Aufwuchsalgen) in der Rhone damit sowohl bei Leuk als auch bei Riddes nur in jenem obersten, meist durch Blockwurf gesicherten Bereich der Flussufer möglich, welcher bei den tieferen Abflüssen im Winterhalbjahr vollständig trockenfällt.

7. Literaturverzeichnis

- ARGE Limnex, Schälchli & Abegg (1997): Trübung im Alpenrhein: Ergebnisse einer Literaturstudie. Bericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Vaduz, 20 pp.
- ARGE Trübung Alpenrhein (2001): Trübung und Schwall im Alpenrhein. Synthesebericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Vaduz, 47 pp.
- Baumann, P. (2004): Revitalisierung und Benthos der Rhone. Schlussbericht zum Ist-Zustand von Subprojekt I-6 des Rhone-Thur Projektes, 101 pp.
- Baumann, P., Klaus, I. (2003): Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes. Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei 75 des BUWAL, Bern, 112 pp. (www.umwelt-schweiz.ch/buwal/shop/).
- Berry, W., Rubinstein, N., Melzian, B., Hill, B. (2003): The biological effects of suspended and bedded sediment (SABS) in aquatic systems: A review. Internal report (www.epa.gov/waterscience/criteria/sediment).
- Binderheim-Bankay, E., Jakob, A. (1999a): Trübungsdynamik, Schwebstoffkonzentrationen und Schwebstofffrachtberechnungen in der Lütchine bei Gsteig und Bönigen. Auswertung von Vergleichsmessungen März - September 1998. Interner Bericht der Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Binderheim-Bankay, E., Jakob, A. (1999b): Trübungsmessungen zur Abschätzung von Schwebstofffrachten. Gas-Wasser-Abwasser 79 (12), 1014 - 1021.
- Bucher, R. (2002): Feinsedimente in schweizerischen Fließgewässern: Einfluss auf die Fischbestände. Bericht von Teilprojekt Nr. 01/07 des Netzwerks Fischrückgang Schweiz (Fischnet), 84 pp.
- Caux, P.-Y., Moore, D.R.J., MacDonald, D. (1997): Ambient water quality guidelines (criteria) for turbidity, suspended and benthic sediments: technical appendix, prepared for the British Columbia Ministry of Environment, Land and Parks, Victoria, 82 pp. (<http://wlapwww.gov.bc.ca/wat/wq>).
- Collet, L.-W., Mellet, R., Stumpf, W. (1916): Le charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse. *Annalen der schweizerischen Landeshydrographie* 2, herausgegeben vom schweizerischen Departement des Innern, Abteilung Wasserwirtschaft, Bern, 187 pp.
- DFO (2000) Effects of sediments on fish and their habitat. DFO Pacific Region Habitat Status Report 2000/01, 9 pp. (www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/psarc/HSRs/hab1.pdf)
- EIFAC (1965): Water quality criteria for European freshwater fish. Report on finely divided solids and inland fisheries. European Inland Fisheries Advisory Commission (EIFAC) technical paper No. 1. *Int. J. Air Wat. Poll.* 9, 151 – 168.
- EPA (2003): Developing water quality criteria for suspended and bedded sediments (SABS), Draft version. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology (www.epa.gov/waterscience/criteria/sediment).
- Frey, M., Moosmann, L., Meier, W. (2003): Bericht über die Messung in den Stauseen: Lac des Dix, Lac de Mauvoisin und Lac d'Emosson. Rhone-Thur Publikation der EAWAG, Kastanienbaum, 10 pp.
- LCH (2002): Le Rhône, à l'amont de Léman. Rapport 19/02 du Laboratoire de Constructions hydrauliques, EPFL, Lausanne, 8 pp.
- LHG (2003): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz für 2003, herausgegeben von der Abteilung Landeshydrologie des Bundesamtes für Wasser und Geologie, Bern, 460 pp.
- Limnex (2001): Trübung und Schwall im Alpenrhein. Fachbericht zu den Teilaspekten Trübung, Licht, Bewuchs und Drift. Bericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Vaduz, 77 pp.
- 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. *Aquat. Sci.* 62, 54 - 67.
- Loizeau, J.-L., Dominik, J. (2001): Le Léman et les barrages, fable moderne? Wasser, ener-

- gie, luft 93 (1/2), 18 - 20.
- Müller, G., Förstner, U. (1969): Sedimenttransport im Mündungsgebiet des Alpenrheins. *Geologische Rundschau* 58, 229 – 259.
- Newcombe, C.P., Jensen, J.O.T. (1996): Channel suspended sediment and fisheries: A synthesis for quantitative assessment of risk and impact. *N. Am. J. Fish. Man.* 16, 693 – 727.
- Peters-Kümmerly, B.E. (1971): Untersuchungen über Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen in einigen Schweizer Flüssen. Diss. Univ. Bern, 76 pp.
- Petz-Glechner, R., Patzner, R.A., Jagsch, A. (1999): Wassertrübe und Fische – Auswirkungen resuspendierter Sedimente aus Speichern auf die Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*). Schriftenreihe Forschung im Verbund Nr. 57, herausgegeben von der österreichischen Elektrizitätswirtschaft-Aktiengesellschaft, Wien, 122 pp.
- Schmassmann, H. (1947): Bericht über die bisherigen Untersuchungen über die Korngrößenverteilung anorganischer Schwebstoffe von alpinen Flüssen. Bericht im Auftrag von Prof. O.Jaag, Zürich.
- Schürch, M. (2000): Détermination des paramètres hydrauliques et hydrochimiques d'un aquifère alluvial dans une vallée alpine (Valais, Suisse). Diss. Univ. Neuchâtel, 232 pp.
- Utrecht, E. (1906): Die Ablation der Rhone in ihrem Walliser Einzugsgebiet im Jahre 1904/05. *Zeitschr. f. Gewässerkunde* 7 (5), 257 – 321.

Tabelle 1

Sehr hohe Schwebstoffkonzentration über kurze Zeitspanne hinweg, bei schwach ansteigendem Abfluss und nicht sehr starkem Niederschlag.

Datum, Zeit	Schwebstoffkonzentration (mg/l)	Abfluss (m³/s)	Niederschlag (0.1mm/h)			
			Datum Zeit	Montana	Zermatt	Evolène
17.06.2003 13:09	740.864	434.73	17.06.2003 10:40	0	0	0
17.06.2003 13:22	740.864	432.95	17.06.2003 11:40	0	0	7
17.06.2003 13:32	735.424	431.34	17.06.2003 12:40	0	0	14
17.06.2003 13:42	732.668	429.72	17.06.2003 13:40	1	7	8
17.06.2003 13:52	754.069	428.34	17.06.2003 14:40	47	2	0
17.06.2003 14:02	851.153	426.96	17.06.2003 15:40	1	0	27
17.06.2003 14:22	1235.191	426.27	17.06.2003 16:40	0	9	0
17.06.2003 14:42	2307.896	428.11	17.06.2003 17:40	0	17	0
17.06.2003 15:02	2868.955	429.95				
17.06.2003 15:21	3183.191	430.40				
17.06.2003 15:31	3197.285	430.64				
17.06.2003 15:41	3248.270	430.88				
17.06.2003 15:51	1287.757	430.07				
17.06.2003 16:01	678.647	429.26				
17.06.2003 16:12	678.647	428.11				
17.06.2003 16:22	677.016	427.42				
17.06.2003 16:32	675.376	426.73				
17.06.2003 16:42	681.887	426.04				
17.06.2003 16:52	681.887	425.34				

Tabelle 2

Beispiele für Ausreisser (rot) bei den Trübungswerten, die auf Fehlmessungen zurückzuführen sind.

Datum, Zeit	Trübung (TEF)	Datum, Zeit	Trübung (TEF)	Datum, Zeit	Trübung (TEF)
05.04.2003 13:01	18	23.06.2003 23:57	239	13.07.2003 12:11	267
05.04.2003 13:22	20	24.06.2003 00:02	239	13.07.2003 12:31	270
05.04.2003 13:32	19	24.06.2003 00:18	238	13.07.2003 13:12	275
05.04.2003 13:42	19	24.06.2003 00:31	240	13.07.2003 13:29	262
05.04.2003 13:52	20	24.06.2003 00:41	239	13.07.2003 13:42	333
05.04.2003 14:02	224	24.06.2003 00:51	239	13.07.2003 13:52	661
05.04.2003 14:12	7066	24.06.2003 01:01	252	13.07.2003 14:22	9432
05.04.2003 14:22	8048	24.06.2003 01:32	9932	13.07.2003 14:32	9891
05.04.2003 14:32	7368	24.06.2003 01:42	9954	13.07.2003 14:42	4573
05.04.2003 14:42	6492	24.06.2003 01:52	403	13.07.2003 14:52	248
05.04.2003 14:52	18	24.06.2003 02:02	245	13.07.2003 15:02	240
05.04.2003 15:02	18	24.06.2003 02:12	247	13.07.2003 15:11	233
05.04.2003 15:11	19	24.06.2003 02:22	247	13.07.2003 15:21	232
05.04.2003 15:28	19	24.06.2003 02:32	248	13.07.2003 15:31	225
05.04.2003 15:41	19	24.06.2003 02:42	247	13.07.2003 15:41	218
05.04.2003 15:51	18	24.06.2003 03:00	247	13.07.2003 15:51	213

Tabelle 3

Trübung zum Zeitpunkt der Schwebstoffkonzentrationsmessung.

Datum, Zeit	Schwebstoffe [mg/l]	Trübe [TEF]	Datum, Zeit	Schwebstoffe [mg/l]	Trübe [TEF]
04.11.2002 12:09	1201.4	1264	02.06.2003 13:42	740.5	150
07.11.2002 13:57	92.5	46	05.06.2003 13:56	588.9	198
11.11.2002 12:26	206	107	10.06.2003 16:56	382.4	209
14.11.2002 12:07	59.7	28	13.06.2003 8:56	3194.5	9864
18.11.2002 12:16	304.2	101	16.06.2003 13:29	769.1	1253
25.11.2002 17:39	172.4	82	19.06.2003 12:10	500.9	245
27.11.2002 14:14	86	65	23.06.2003 13:58	707	246
30.11.2002 15:34	32.4	68	26.06.2003 13:57	1134.5	416
01.12.2002 13:58	67.4	12	30.06.2003 13:55	591.9	190
06.12.2002 16:22	32.9	44	03.07.2003 12:54	287.2	155
09.12.2002 13:47	81.7	27	07.07.2003 13:57	303.3	150
15.12.2002 10:48	6.3	19	10.07.2003 12:03	281.2	137
16.12.2002 16:50	45.3	41	14.07.2003 13:56	834.3	305
19.12.2002 12:15	44.7	45	21.07.2003 13:54	704.5	985
23.12.2002 14:00	107.1	168	24.07.2003 12:04	969.5	447
26.12.2002 11:48	2.9	8	28.07.2003 13:54	1454.7	2480
30.12.2002 13:47	4.7	7	31.07.2003 13:58	331.4	182
03.01.2003 17:22	37	39	04.08.2003 13:57	1151.4	563
06.01.2003 13:21	34.9	21	07.08.2003 12:34	1245.8	444
10.01.2003 8:16	22.4	31	11.08.2003 12:25	898.6	405
13.01.2003 13:31	30.4	15	14.08.2003 12:03	772.7	409
16.01.2003 13:59	12.2	15	18.08.2003 13:57	1208.7	693
21.01.2003 17:58	19.8	44	21.08.2003 12:11	579.7	214
23.01.2003 13:34	17.4	19	28.08.2003 13:55	600.7	222
27.01.2003 13:40	14.3	15	01.09.2003 11:31	520.5	143
31.01.2003 15:05	54.6	125	04.09.2003 13:57	177.6	125
03.02.2003 13:40	20.9	14	08.09.2003 13:51	160.1	111
06.02.2003 13:58	14	26	11.09.2003 13:56	196.6	98
10.02.2003 13:25	29.9	26	15.09.2003 13:55	69.9	46
13.02.2003 14:03	18.6	19	18.09.2003 12:08	42.7	68
17.02.2003 18:03	29	26	22.09.2003 13:57	128.2	137
21.02.2003 13:15	22.4	24	25.09.2003 12:06	62.1	78
24.02.2003 13:59	27	20	29.09.2003 13:50	38.1	74
27.02.2003 8:53	12.4	22	02.10.2003 13:53	33.9	109
03.03.2003 13:56	42.5	43	06.10.2003 13:56	122.8	65
06.03.2003 13:40	23.8	27	09.10.2003 13:42	232.9	352
10.03.2003 13:59	51.9	42	13.10.2003 13:12	127.1	100
13.03.2003 12:26	20.9	34	16.10.2003 13:59	34.9	94
17.03.2003 16:59	53	40	20.10.2003 13:56	45	52
20.03.2003 13:20	30.3	28	23.10.2003 13:58	31.4	46
24.03.2003 12:16	33	21	27.10.2003 13:53	32.4	22
27.03.2003 12:12	14.9	23	30.10.2003 12:18	17.9	34
31.03.2003 13:54	55.2	40	03.11.2003 13:48	55.6	74
03.04.2003 13:47	57.5	39	06.11.2003 13:30	18.2	45
07.04.2003 12:07	27.2	33	10.11.2003 13:43	30.1	40
10.04.2003 12:13	38.1	36	13.11.2003 12:19	25.8	33
14.04.2003 13:53	51.4	40	17.11.2003 10:54	21.8	42
17.04.2003 13:15	26.4	46	20.11.2003 13:54	17.8	28
21.04.2003 13:01	8.7	12	24.11.2003 13:10	34.6	56
24.04.2003 12:08	22.5	60	27.11.2003 13:45	28.9	35
28.04.2003 12:38	53.7	57	01.12.2003 13:31	29.7	35
05.05.2003 12:17	65.3	69	04.12.2003 13:39	31.6	33
08.05.2003 12:03	411.7	152	08.12.2003 13:11	47.1	42
12.05.2003 12:03	277	109	12.12.2003 8:41	25	50
15.05.2003 12:14	499.2	257	15.12.2003 17:35	57.2	89
19.05.2003 12:22	209.2	172	18.12.2003 13:40	23.1	34
22.05.2003 13:49	245.4	98	22.12.2003 12:02	19.4	45
26.05.2003 12:28	196.5	57	26.12.2003 18:17	13.1	25
29.05.2003 12:04	343.2	114	29.12.2003 13:26	15.1	26

Tabelle 4

Temperatur in Aigle vom 1.8.2003 – 13.8.2003 (rot = tägliche Spitzenwerte).

Datum, Zeit	Temp. (°C)	Datum, Zeit	Temp. (°C)	Datum, Zeit	Temp. (°C)
1.8.2003 0:40	12.9	5.8.2003 8:40	26.8	9.8.2003 16:40	32.4
1.8.2003 1:40	12.4	5.8.2003 9:40	28.5	9.8.2003 17:40	31.0
1.8.2003 2:40	12.2	5.8.2003 10:40	29.6	9.8.2003 18:40	27.2
1.8.2003 3:40	12.0	5.8.2003 11:40	30.1	9.8.2003 19:40	25.7
1.8.2003 4:40	12.1	5.8.2003 12:40	30.7	9.8.2003 20:40	23.2
1.8.2003 5:40	12.8	5.8.2003 13:40	31.9	9.8.2003 21:40	21.7
1.8.2003 6:40	16.4	5.8.2003 14:40	32.7	9.8.2003 22:40	21.7
1.8.2003 7:40	18.6	5.8.2003 15:40	33.0	9.8.2003 23:40	19.4
1.8.2003 8:40	19.8	5.8.2003 16:40	32.4	10.8.2003 0:40	19.8
1.8.2003 9:40	21.8	5.8.2003 17:40	29.9	10.8.2003 1:40	18.2
1.8.2003 10:40	23.1	5.8.2003 18:40	27.8	10.8.2003 2:40	18.3
1.8.2003 11:40	24.4	5.8.2003 19:40	26.5	10.8.2003 3:40	17.3
1.8.2003 12:40	25.7	5.8.2003 20:40	25.8	10.8.2003 4:40	16.4
1.8.2003 13:40	26.8	5.8.2003 21:40	24.9	10.8.2003 5:40	17.7
1.8.2003 14:40	27.4	5.8.2003 22:40	24.1	10.8.2003 6:40	21.3
1.8.2003 15:40	27.4	5.8.2003 23:40	23.6	10.8.2003 7:40	24.9
1.8.2003 16:40	27.4	6.8.2003 0:40	23.2	10.8.2003 8:40	26.9
1.8.2003 17:40	26.3	6.8.2003 1:40	22.9	10.8.2003 9:40	28.1
1.8.2003 18:40	24.6	6.8.2003 2:40	22.6	10.8.2003 10:40	29.1
1.8.2003 19:40	21.3	6.8.2003 3:40	21.7	10.8.2003 11:40	30.0
1.8.2003 20:40	20.1	6.8.2003 4:40	21.3	10.8.2003 12:40	31.3
1.8.2003 21:40	18.2	6.8.2003 5:40	21.4	10.8.2003 13:40	31.1
1.8.2003 22:40	17.2	6.8.2003 6:40	22.7	10.8.2003 14:40	31.8
1.8.2003 23:40	15.9	6.8.2003 7:40	24.4	10.8.2003 15:40	32.4
2.8.2003 0:40	15.7	6.8.2003 8:40	26.2	10.8.2003 16:40	30.8
2.8.2003 1:40	16.0	6.8.2003 9:40	28.0	10.8.2003 17:40	28.2
2.8.2003 2:40	15.4	6.8.2003 10:40	29.6	10.8.2003 18:40	25.0
2.8.2003 3:40	14.6	6.8.2003 11:40	30.9	10.8.2003 19:40	23.4
2.8.2003 4:40	14.1	6.8.2003 12:40	30.3	10.8.2003 20:40	22.3
2.8.2003 5:40	14.8	6.8.2003 13:40	31.1	10.8.2003 21:40	22.4
2.8.2003 6:40	18.6	6.8.2003 14:40	31.9	10.8.2003 22:40	19.3
2.8.2003 7:40	21.3	6.8.2003 15:40	32.4	10.8.2003 23:40	19.0
2.8.2003 8:40	23.1	6.8.2003 16:40	31.6	11.8.2003 0:40	19.0
2.8.2003 9:40	24.4	6.8.2003 17:40	28.8	11.8.2003 1:40	18.6
2.8.2003 10:40	25.5	6.8.2003 18:40	26.0	11.8.2003 2:40	17.9
2.8.2003 11:40	26.3	6.8.2003 19:40	23.3	11.8.2003 3:40	17.0
2.8.2003 12:40	27.3	6.8.2003 20:40	22.1	11.8.2003 4:40	18.3
2.8.2003 13:40	28.3	6.8.2003 21:40	21.6	11.8.2003 5:40	19.3
2.8.2003 14:40	28.9	6.8.2003 22:40	21.1	11.8.2003 6:40	22.7
2.8.2003 15:40	28.9	6.8.2003 23:40	21.3	11.8.2003 7:40	25.1
2.8.2003 16:40	28.2	7.8.2003 0:40	20.2	11.8.2003 8:40	26.7
2.8.2003 17:40	26.7	7.8.2003 1:40	20.3	11.8.2003 9:40	28.3
2.8.2003 18:40	24.8	7.8.2003 2:40	19.1	11.8.2003 10:40	29.6
2.8.2003 19:40	21.4	7.8.2003 3:40	18.6	11.8.2003 11:40	31.7
2.8.2003 20:40	21.4	7.8.2003 4:40	18.5	11.8.2003 12:40	34.1
2.8.2003 21:40	20.3	7.8.2003 5:40	19.0	11.8.2003 13:40	34.6
2.8.2003 22:40	19.0	7.8.2003 6:40	22.8	11.8.2003 14:40	34.7
2.8.2003 23:40	18.2	7.8.2003 7:40	25.3	11.8.2003 15:40	34.5

3.8.2003 0:40	18.3	7.8.2003 8:40	27.1	11.8.2003 16:40	33.4
3.8.2003 1:40	18.1	7.8.2003 9:40	28.7	11.8.2003 17:40	30.3
3.8.2003 2:40	17.0	7.8.2003 10:40	29.4	11.8.2003 18:40	26.1
3.8.2003 3:40	16.6	7.8.2003 11:40	30.5	11.8.2003 19:40	22.9
3.8.2003 4:40	17.0	7.8.2003 12:40	31.0	11.8.2003 20:40	21.0
3.8.2003 5:40	17.1	7.8.2003 13:40	30.9	11.8.2003 21:40	21.0
3.8.2003 6:40	20.3	7.8.2003 14:40	31.9	11.8.2003 22:40	19.1
3.8.2003 7:40	23.4	7.8.2003 15:40	33.7	11.8.2003 23:40	18.5
3.8.2003 8:40	25.3	7.8.2003 16:40	33.8	12.8.2003 0:40	17.7
3.8.2003 9:40	26.3	7.8.2003 17:40	31.9	12.8.2003 1:40	17.7
3.8.2003 10:40	27.5	7.8.2003 18:40	31.5	12.8.2003 2:40	17.5
3.8.2003 11:40	28.0	7.8.2003 19:40	26.7	12.8.2003 3:40	18.9
3.8.2003 12:40	29.0	7.8.2003 20:40	23.1	12.8.2003 4:40	19.8
3.8.2003 13:40	29.8	7.8.2003 21:40	21.6	12.8.2003 5:40	18.8
3.8.2003 14:40	30.3	7.8.2003 22:40	19.8	12.8.2003 6:40	22.4
3.8.2003 15:40	30.5	7.8.2003 23:40	18.3	12.8.2003 7:40	24.5
3.8.2003 16:40	30.2	8.8.2003 0:40	17.5	12.8.2003 8:40	26.7
3.8.2003 17:40	28.2	8.8.2003 1:40	17.9	12.8.2003 9:40	28.4
3.8.2003 18:40	24.3	8.8.2003 2:40	16.9	12.8.2003 10:40	29.6
3.8.2003 19:40	22.2	8.8.2003 3:40	16.7	12.8.2003 11:40	30.0
3.8.2003 20:40	21.4	8.8.2003 4:40	17.3	12.8.2003 12:40	30.8
3.8.2003 21:40	20.7	8.8.2003 5:40	18.0	12.8.2003 13:40	32.0
3.8.2003 22:40	19.7	8.8.2003 6:40	21.8	12.8.2003 14:40	32.8
3.8.2003 23:40	18.3	8.8.2003 7:40	24.7	12.8.2003 15:40	33.3
4.8.2003 0:40	18.6	8.8.2003 8:40	26.7	12.8.2003 16:40	33.3
4.8.2003 1:40	18.9	8.8.2003 9:40	27.8	12.8.2003 17:40	30.9
4.8.2003 2:40	18.7	8.8.2003 10:40	28.8	12.8.2003 18:40	25.4
4.8.2003 3:40	17.1	8.8.2003 11:40	29.6	12.8.2003 19:40	23.5
4.8.2003 4:40	17.1	8.8.2003 12:40	29.7	12.8.2003 20:40	23.2
4.8.2003 5:40	16.7	8.8.2003 13:40	28.9	12.8.2003 21:40	19.7
4.8.2003 6:40	21.2	8.8.2003 14:40	28.7	12.8.2003 22:40	17.6
4.8.2003 7:40	24.9	8.8.2003 15:40	30.5	12.8.2003 23:40	17.5
4.8.2003 8:40	26.2	8.8.2003 16:40	30.1	13.8.2003 0:40	17.4
4.8.2003 9:40	27.1	8.8.2003 17:40	27.8	13.8.2003 1:40	16.9
4.8.2003 10:40	28.4	8.8.2003 18:40	24.2	13.8.2003 2:40	18.0
4.8.2003 11:40	29.2	8.8.2003 19:40	22.8	13.8.2003 3:40	16.0
4.8.2003 12:40	30.1	8.8.2003 20:40	21.1	13.8.2003 4:40	16.0
4.8.2003 13:40	31.0	8.8.2003 21:40	21.2	13.8.2003 5:40	18.1
4.8.2003 14:40	31.5	8.8.2003 22:40	20.1	13.8.2003 6:40	21.9
4.8.2003 15:40	31.4	8.8.2003 23:40	19.7	13.8.2003 7:40	24.8
4.8.2003 16:40	31.5	9.8.2003 0:40	17.6	13.8.2003 8:40	26.9
4.8.2003 17:40	30.4	9.8.2003 1:40	17.3	13.8.2003 9:40	29.0
4.8.2003 18:40	27.0	9.8.2003 2:40	16.5	13.8.2003 10:40	30.1
4.8.2003 19:40	24.6	9.8.2003 3:40	16.4	13.8.2003 11:40	30.9
4.8.2003 20:40	23.0	9.8.2003 4:40	16.2	13.8.2003 12:40	31.8
4.8.2003 21:40	21.6	9.8.2003 5:40	17.0	13.8.2003 13:40	32.6
4.8.2003 22:40	20.7	9.8.2003 6:40	21.6	13.8.2003 14:40	32.6
4.8.2003 23:40	20.7	9.8.2003 7:40	24.2	13.8.2003 15:40	31.1
5.8.2003 0:40	19.7	9.8.2003 8:40	26.0	13.8.2003 16:40	31.5
5.8.2003 1:40	19.2	9.8.2003 9:40	27.8	13.8.2003 17:40	29.3
5.8.2003 2:40	18.6	9.8.2003 10:40	28.7	13.8.2003 18:40	25.1
5.8.2003 3:40	18.6	9.8.2003 11:40	29.3	13.8.2003 19:40	23.6
5.8.2003 4:40	17.8	9.8.2003 12:40	29.8	13.8.2003 20:40	22.1
5.8.2003 5:40	18.1	9.8.2003 13:40	31.2	13.8.2003 21:40	21.6
5.8.2003 6:40	21.9	9.8.2003 14:40	31.5	13.8.2003 22:40	20.8
5.8.2003 7:40	25.2	9.8.2003 15:40	31.4	13.8.2003 23:40	23.3

Tabelle 5: Unterschiedliche Resultate für die monatliche Schwebstofffracht der Methoden 1, 2 und 3. Prozentuale Abweichung von der Methode 1.

Monatsfrachten (kt)	Methode 1	Methode 2	Methode 3	Abweichung von Methode 1 (in Prozent)	
				Methode 2	Methode 3
Jan	18.5	27.3	20.1	-48.1	-9.1
Feb	11.9	26.3	19.3	-120.2	-61.7
Mrz	11.8	13.7	9.5	-16.0	19.9
Apr	23.0	16.1	11.4	29.9	50.6
Mai	175.1	124.3	103.5	29.0	40.9
Jun	809.3	716.9	688.7	11.4	14.9
Jul	582.9	392.5	359.2	32.7	38.4
Aug	769.3	536.5	500.0	30.3	35.0
Sep	96.8	61.3	48.6	36.7	49.9
Okt	64.1	27.1	19.8	57.7	69.2
Nov	23.7	9.4	6.3	60.2	73.3
Dez	17.2	8.9	6.1	48.0	64.6
Jahresfracht	2603.8	1960.5	1792.3	24.7	31.2

Tabelle 6

Schwebstofffrachten in kt pro Monat (die Angaben für das Jahr 2003 wurden mit Methode 1 berechnet).

	1904/05	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
Jan	4.0	6.2	15.1	13.2	10.4	22.4	12.9	22.2	8.8	23.5	10.0	20.5
Feb	1.1	8.6	14.9	17.7	13.6	15.0	13.3	11.7	15.7	13.0	54.8	26.5
Mrz	8.1	35.2	15.7	14.9	15.2	12.9	8.6	18.4	34.4	15.8	32.2	15.9
Apr	92.0	120.8	25.5	24.4	18.1	14.1	13.0	28.3	42.7	25.6	23.9	20.6
Mai	475.1	22.4	155.7	86.6	35.5	100.3	517.7	46.8	227.1	150.6	160.1	21.0
Jun	828.6	67.8	649.4	667.3	484.8	447.9	359.9	340.1	249.8	151.4	248.8	427.0
Jul	947.6	1059.5	923.7	1244.9	604.0	605.9	299.5	976.6	500.2	364.3	436.2	459.8
Aug	639.2	423.8	490.8	323.0	178.3	191.9	277.1	570.8	483.2	395.5	311.0	278.2
Sep	77.9	445.9	168.8	205.8	46.0	91.1	76.4	187.1	112.3	47.2	101.2	137.9
Okt	16.8	337.0	30.2	19.8	17.9	35.7	30.0	30.0	93.2	14.3	41.9	26.7
Nov	1.8	246.7	9.2	17.2	10.7	17.0	8.1	17.6	23.2	10.2	23.6	17.7
Dez	2.2	14.2	10.5	8.3	9.3	6.8	9.1	16.3	21.4	9.5	22.3	18.0
Jahr	3094	2778	2510	2643	1444	1561	1626	2266	1892	1221	1466	1470
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Jan	16.8	29.9	24.6	29.8	11.5	16.9	15.1	6.6	18.5	17.5	8.4	18.5
Feb	15.1	29.4	25.4	25.5	19.7	10.2	17.4	13.8	12.3	20.5	6.1	11.9
Mrz	11.1	24.4	31.8	25.6	8.6	11.3	15.3	10.9	16.5	63.5	14.7	11.8
Apr	18.1	25.8	26.0	29.8	6.9	14.2	8.6	15.7	17.8	38.8	13.7	23.0
Mai	145.3	135.4	239.7	247.8	65.5	59.9	54.5	1090.8	230.4	431.7	90.9	175.1
Jun	317.9	495.7	664.4	475.5	340.5	361.6	675.6	947.6	413.3	650.4	715.6	809.3
Jul	348.4	388.9	750.5	1071.8	229.9	237.1	500.1	376.0	189.1	690.4	335.7	582.9
Aug	417.4	321.7	516.7	298.8	156.9	303.5	463.8	328.0	147.7	538.1	186.9	769.3
Sep	110.6	685.2	373.9	54.5	14.3	231.4	101.6	95.3	50.0	67.8	68.6	96.8
Okt	33.0	82.7	56.8	22.7	13.2	33.5	12.5	24.4	1194.7	22.2	19.2	64.1
Nov	56.9	31.6	35.3	16.8	14.7	13.7	23.3	17.0	26.9	15.0	55.1	23.7
Dez	37.4	30.6	26.6	18.5	16.5	16.9	16.5	13.0	14.1	12.8	22.1	17.2
Jahr	1528	2281	2771	2317	898	1310	1904	2939	2331	2569	1537	2604

Tabelle 7

Mittlerer Abflusswert und Schwebstoffkonzentration jedes Tages von April 1904 – März 1905.

Datum	mittl. Abfluss m ³ /s	Schwebstoff- konz. mg/l	Datum	mittl. Abfluss m ³ /s	Schwebstoff- konz. mg/l
01.04.1904	51	14	01.05.1904	178	112
02.04.1904	56	30	02.05.1904	189	93
03.04.1904	53	32	03.05.1904	209	175
04.04.1904	58	103	04.05.1904	205	80
05.04.1904	69	46	05.05.1904	190	57
06.04.1904	63	10	06.05.1904	173	46
07.04.1904	75	110	07.05.1904	174	53
08.04.1904	83	82	08.05.1904	164	53
09.04.1904	84	78	09.05.1904	143	76
10.04.1904	102	174	10.05.1904	137	30
11.04.1904	113	173	11.05.1904	156	86
12.04.1904	107	75	12.05.1904	144	54
13.04.1904	110	112	13.05.1904	142	14
14.04.1904	137	359	14.05.1904	149	34
15.04.1904	185	587	15.05.1904	178	108
16.04.1904	225	654	16.05.1904	210	196
17.04.1904	263	614	17.05.1904	247	340
18.04.1904	260	380	18.05.1904	312	668
19.04.1904	240	446	19.05.1904	451	1693
20.04.1904	265	356	20.05.1904	492	1173
21.04.1904	242	228	21.05.1904	517	882
22.04.1904	225	149	22.05.1904	512	709
23.04.1904	205	166	23.05.1904	553	800
24.04.1904	190	87	24.05.1904	471	576
25.04.1904	181	84	25.05.1904	381	342
26.04.1904	185	70	26.05.1904	401	336
27.04.1904	179	92	27.05.1904	503	728
28.04.1904	158	42	28.05.1904	572	1136
29.04.1904	150	64	29.05.1904	514	493
30.04.1904	159	29	30.05.1904	538	389
			31.05.1904	538	667
<hr/>					
01.06.1904	610	1033	01.07.1904	461	408
02.06.1904	583	519	02.07.1904	471	358
03.06.1904	464	453	03.07.1904	488	461
04.06.1904	399	319	04.07.1904	498	542
05.06.1904	369	137	05.07.1904	456	413
06.06.1904	356	219	06.07.1904	419	284
07.06.1904	374	347	07.07.1904	417	409
08.06.1904	408	469	08.07.1904	461	424
09.06.1904	530	575	09.07.1904	523	898
10.06.1904	573	640	10.07.1904	570	862
11.06.1904	550	665	11.07.1904	562	703
12.06.1904	530	500	12.07.1904	540	731
13.06.1904	516	400	13.07.1904	543	733
14.06.1904	526	536	14.07.1904	498	782
15.06.1904	523	542	15.07.1904	507	1063
16.06.1904	459	312	16.07.1904	533	944
17.06.1904	538	542	17.07.1904	578	1198
18.06.1904	606	822	18.07.1904	584	1122

19.06.1904	642	791	19.07.1904	567	1262
20.06.1904	545	502	20.07.1904	523	942
21.06.1904	490	460	21.07.1904	515	623
22.06.1904	480	395	22.07.1904	545	1229
23.06.1904	477	477	23.07.1904	545	642
24.06.1904	492	426	24.07.1904	533	1064
25.06.1904	575	1930	25.07.1904	456	548
26.06.1904	624	764	26.07.1904	485	672
27.06.1904	747	1110	27.07.1904	447	533
28.06.1904	609	431	28.07.1904	372	299
29.06.1904	515	556	29.07.1904	364	337
30.06.1904	495	537	30.07.1904	372	373
			31.07.1904	405	523
<hr/>					
01.08.1904	432	870	01.09.1904	325	474
02.08.1904	485	993	02.09.1904	256	267
03.08.1904	456	492	03.09.1904	205	151
04.08.1904	439	562	04.09.1904	203	141
05.08.1904	461	784	05.09.1904	203	141
06.08.1904	439	573	06.09.1904	207	171
07.08.1904	463	746	07.09.1904	209	216
08.08.1904	485	755	08.09.1904	217	124
09.08.1904	492	857	09.09.1904	212	158
10.08.1904	477	822	10.09.1904	197	121
11.08.1904	456	772	11.09.1904	209	122
12.08.1904	463	768	12.09.1904	225	138
13.08.1904	422	590	13.09.1904	225	198
14.08.1904	414	527	14.09.1904	287	208
15.08.1904	442	503	15.09.1904	316	314
16.08.1904	435	477	16.09.1904	227	135
17.08.1904	456	777	17.09.1904	185	98
18.08.1904	530	1228	18.09.1904	169	70
19.08.1904	411	664	19.09.1904	162	85
20.08.1904	366	402	20.09.1904	155	76
21.08.1904	364	441	21.09.1904	137	85
22.08.1904	385	479	22.09.1904	132	53
23.08.1904	309	230	23.09.1904	114	50
24.08.1904	221	140	24.09.1904	106	63
25.08.1904	199	125	25.09.1904	100	270
26.08.1904	173	86	26.09.1904	93	37
27.08.1904	164	108	27.09.1904	90	30
28.08.1904	173	141	28.09.1904	90	26
29.08.1904	189	176	29.09.1904	90	14
30.08.1904	205	167	30.09.1904	84	141
31.08.1904	316	965			
<hr/>					
01.10.1904	77	12	01.11.1904	61	26
02.10.1904	78	354	02.11.1904	58	7
03.10.1904	77	72	03.11.1904	57	2
04.10.1904	76	25	04.11.1904	55	7
05.10.1904	77	37	05.11.1904	54	15
06.10.1904	77	33	06.11.1904	52	1
07.10.1904	93	82	07.11.1904	50	30
08.10.1904	149	138	08.11.1904	49	21
09.10.1904	125	30	09.11.1904	47	21

10.10.1904	106	27	10.11.1904	49	21
11.10.1904	99	40	11.11.1904	50	24
12.10.1904	99	7	12.11.1904	48	3
13.10.1904	92	44	13.11.1904	48	2
14.10.1904	92	34	14.11.1904	45	23
15.10.1904	87	45	15.11.1904	43	61
16.10.1904	85	17	16.11.1904	41	
17.10.1904	79	1	17.11.1904	41	16
18.10.1904	73	11	18.11.1904	39	
19.10.1904	72	5	19.11.1904	40	12
20.10.1904	77	8	20.11.1904	41	16
21.10.1904	77	13	21.11.1904	39	14
22.10.1904	73	5	22.11.1904	39	11
23.10.1904	73	4	23.11.1904	39	6
24.10.1904	70	11	24.11.1904	40	12
25.10.1904	68	2	25.11.1904	38	5
26.10.1904	66		26.11.1904	38	11
27.10.1904	64	2	27.11.1904	34	20
28.10.1904	68	9	28.11.1904	34	11
29.10.1904	64	5	29.11.1904	34	20
30.10.1904	66	25	30.11.1904	34	51
31.10.1904	65	13			
<hr/>					
01.12.1904	35	48	01.01.1905	43	48
02.12.1904	36	41	02.01.1905	44	17
03.12.1904	37	29	03.01.1905	34	99
04.12.1904	38	39	04.01.1905	69	38
05.12.1904	35	8	05.01.1905	85	76
06.12.1904	35	39	06.01.1905	68	25
07.12.1904	39	19	07.01.1905	62	102
08.12.1904	55	53	08.01.1905	62	84
09.12.1904	45		09.01.1905	29	52
10.12.1904	40	6	10.01.1905	34	52
11.12.1904	40	52	11.01.1905	32	52
12.12.1904	39		12.01.1905	28	20
13.12.1904	37	6	13.01.1905	27	16
14.12.1904	36	21	14.01.1905	26	19
15.12.1904	35	16	15.01.1905	29	17
16.12.1904	35	9	16.01.1905	29	14
17.12.1904	35	1	17.01.1905	29	138
18.12.1904	37	21	18.01.1905	29	32
19.12.1904	37	17	19.01.1905	27	22
20.12.1904	36	23	20.01.1905	27	5
21.12.1904	34	9	21.01.1905	27	27
22.12.1904	33	2	22.01.1905	27	22
23.12.1904	34	7	23.01.1905	27	8
24.12.1904	34	2	24.01.1905	26	
25.12.1904	34	2	25.01.1905	26	28
26.12.1904	34	26	26.01.1905	26	3
27.12.1904	34	15	27.01.1905	26	34
28.12.1904	34	4	28.01.1905	26	5
29.12.1904	34	39	29.01.1905	26	16
30.12.1904	34	10	30.01.1905	26	24
31.12.1904	45	79	31.01.1905	26	10

01.02.1905	26	106	01.03.1905	25	12
02.02.1905	25	22	02.03.1905	25	6
03.02.1905	26	24	03.03.1905	26	9
04.02.1905	25	27	04.03.1905	26	10
05.02.1905	25	30	05.03.1905	26	8
06.02.1905	25	26	06.03.1905	26	14
07.02.1905	26	17	07.03.1905	26	6
08.02.1905	26	2	08.03.1905	26	2
09.02.1905	25	3	09.03.1905	26	12
10.02.1905	25	4	10.03.1905	27	
11.02.1905	25	8	11.03.1905	26	18
12.02.1905	25	2	12.03.1905	28	59
13.02.1905	25	12	13.03.1905	30	15
14.02.1905	25	7	14.03.1905	29	28
15.02.1905	25	7	15.03.1905	28	18
16.02.1905	25	7	16.03.1905	30	6
17.02.1905	25	7	17.03.1905	34	2
18.02.1905	24	11	18.03.1905	32	15
19.02.1905	24	17	19.03.1905	36	21
20.02.1905	24	23	20.03.1905	36	43
21.02.1905	24	16	21.03.1905	26	73
22.02.1905	24	16	22.03.1905	36	53
23.02.1905	24	25	23.03.1905	35	
24.02.1905	24	4	24.03.1905	35	17
25.02.1905	25	38	25.03.1905	34	10
26.02.1905	25	19	26.03.1905	34	11
27.02.1905	25	36	27.03.1905	33	24
28.02.1905	25	7	28.03.1905	49	281
			29.03.1905	51	358
			30.03.1905	46	28
			31.03.1905	72	625

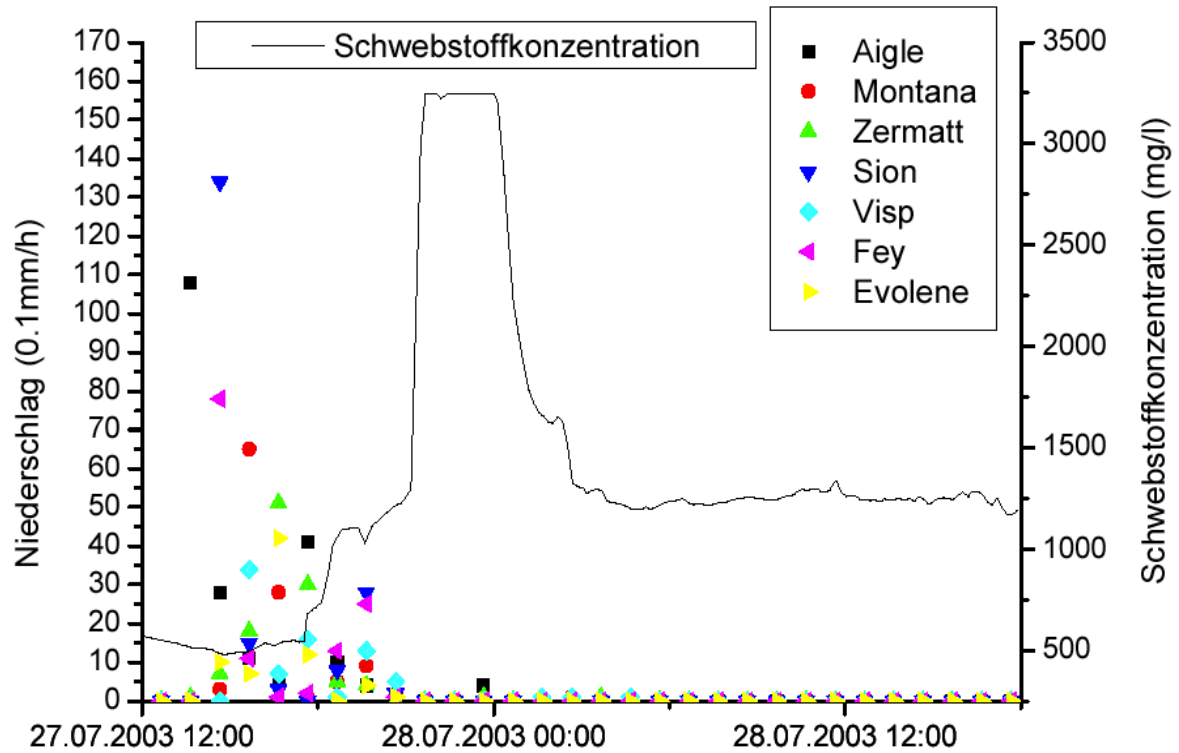


Abbildung 1

Darstellung der Schwebstoffkonzentration und des Niederschlags pro Stunde vom 27. Juli 14⁰⁰ – 28. Juli 2003 18⁰⁰. Werte über 3'264.7 mg/l (10'000 TEF) sind abgeschnitten (Erfassungsgrenze).

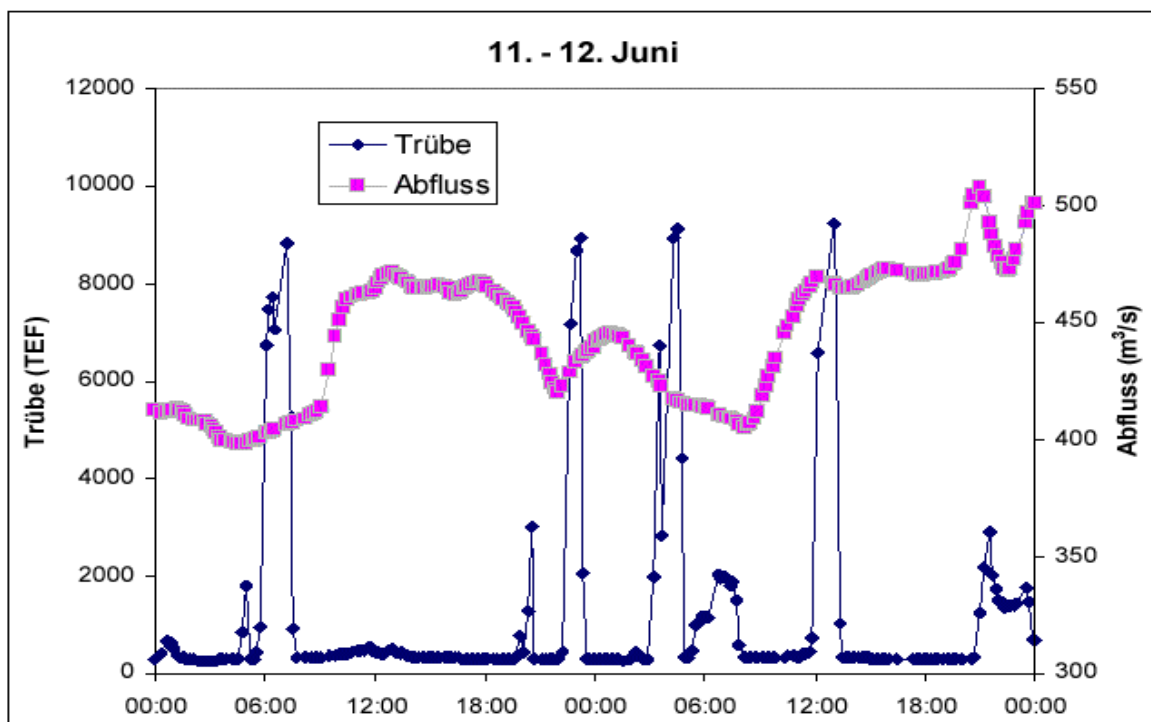


Abbildung 2

Ungewöhnlich hohe Trübungswerte im Juni 2003, die nicht lange anhalten.

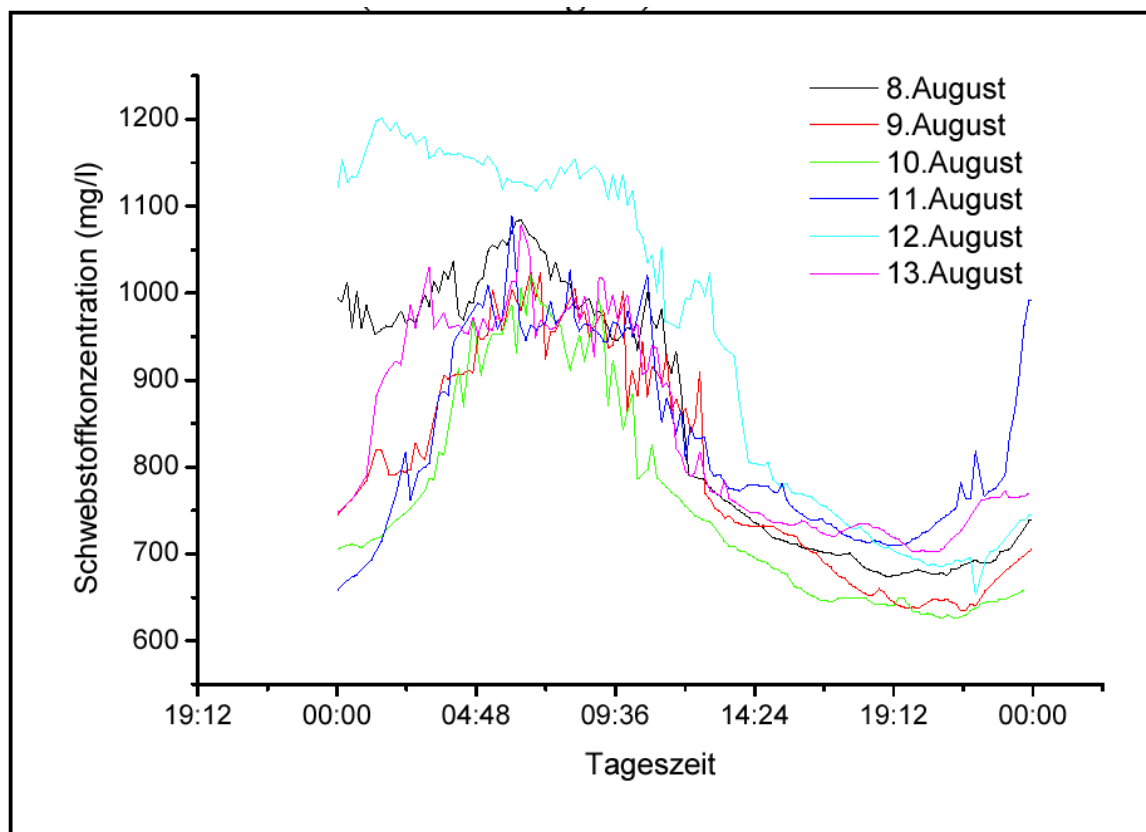


Abbildung 3: Tagesverlauf der Schwebstoffkonzentration während der Gletscherschmelze im August 2003.