



Schlussbericht Rhone Ist-Zustand

Rhone-Thur Projekt

Subprojekt I-2: Wassertemperaturen und Wärmehaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche

Werner Meier, Martin Frey, Lorenz Moosmann, Seraina Steinlin und Alfred Wüest

EAWAG, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum



August 2004

Legende zum Titelblatt: Auslass des Kraftwerks Mauvoisin bei der Mündung in die Rhone.

Dieser Bericht ist wie folgt zu zitieren:

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

ZUSAMMENFASSUNG

In der unkorrigierten Rhone vor der Kanalisierung gab es im Längs- und Querschnitt viel grössere Temperaturvariationen als heute. Die Wassertemperatur im Hauptstrombereich war durch den grossen Einfluss der Gletscher und der Schneeschmelze zwar auch relativ tief, aber über den Talquerschnitt gab es in den unterschiedlichen Lebensräumen grosse Unterschiede von mehr als 10°C, wie sie heute noch beim unbeeinflussten Tagliamento in den Südostalpen vorkommen. Durch die Korrekturen wurde die Wasseroberfläche und die Aufenthaltszeit des Wassers sowie der Austausch mit dem Grundwasser verkleinert und damit auch der Energieaustausch mit Atmosphäre und Sediment.

In der kanalisierten Rhone ist die Wassertemperatur praktisch über den gesamten Querschnitt gleich gross. Rückzugsmöglichkeiten wie Totarme und Stillwasserzonen mit unterschiedlichen Wassertemperaturen sind für die Fliessgewässerorganismen nicht mehr zugänglich.

Durch den Einfluss der Wasserkraftwerke wurden die jährlichen Temperaturschwankungen geglättet, also im Winter um ca. 2°C erhöht und im Sommer im Mittel um ca. 1°C erniedrigt. Rund ein Zehntel der jährlich in den Genfersee eingetragenen Energiemenge von 55 TWh der Rhone wird durch die Stauseen vom Sommerhalbjahr ins Winterhalbjahr übertragen. Die vergrösserte Wasseroberfläche in Stauseen führt zu einer um einen Siebtel grösseren Energieaufnahme. Die Produktion von elektrischem Strom in den Wasserkraftwerken entzieht der Rhone rund ein Fünftel der jährlichen Energie. Durch die Produktion von Spitzenstrom kommen v.a. im März/April und September/Okttober kurzfristige Temperaturschwankungen (Schwall/Sunk-Effekte) in der Rhone von bis zu 2.4°C pro Stunde vor. Bei besonders stark beeinflussten Zuflüssen wie der Lonza und der Lizerne werden die täglichen Temperaturschwankungen total verändert (z.B. mit Temperaturmaxima in der Nacht statt am Nachmittag). Die Erhöhung der Wassertemperatur um 0.8°C in den letzten 20 Jahren durch die Klimaänderung kompensiert die kühlenden Effekte der Wasserkraftwerke teilweise.

Die grössten ökologischen Defizite bei der Wassertemperatur der Rhone sind die fehlende Temperaturvariabilität aufgrund der Korrekturen und der abgesenkte und geglättete Jahrgang sowie die kurzfristigen Temperaturschwankungen durch die Wasserkraftwerke. Weitere menschliche Einflüsse auf den Temperaturhaushalt der Rhone wie Kühlwasserzuflüsse und Wasserentnahmen spielen eine untergeordnete Rolle.

Für eine Verkleinerung der negativen Effekte des veränderten Temperaturhaushalts der Rhone werden folgende Massnahmen empfohlen:

- (Bessere) Anbindung von Totarmen und Seitenbächen, damit die Fliessgewässerorganismen bei intolerablen Temperaturbedingungen in der Rhone Rückzugsmöglichkeiten haben
- Grossflächige Aufweitungen, bei welchen auch Stillwasserzonen entstehen
- Ausgleichsbecken unterhalb der Wasserkraftwerke, welche die Abflussänderungen durch Schwall/Sunk dämpfen und auch die Temperaturschwankungen verkleinern.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	5
1.1	AUSGANGSLAGE UND PROBLEMDEFINITION.....	5
1.2	ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN.....	6
1.3	GLIEDERUNG DES BERICHTS.....	7
2	WÄRME- UND TEMPERATURHAUSHALT IN FLÜSSEN	8
2.1	NATÜRLICHE EINFLUSSFAKTOREN.....	8
2.2	ANTHROPOGENE EINFLUSSFAKTOREN.....	9
3	DIE TEMPERATUR DER RHONE UND IHRER ZUFLÜSSE.....	11
3.1	HISTORISCHE AUFZEICHNUNGEN.....	12
3.2	LANGZEITMESSUNGEN DES BWG.....	13
3.3	MESSUNGEN DER EAWAG VON 2001 BIS 2003.....	16
3.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	29
4	REKONSTRUKTION DER NATÜRLICHEN WASSERTEMPERATUR DER RHONE.....	30
4.1	REPRÄSENTATIVITÄT DER HISTORISCHEN MESSUNGEN.....	30
4.2	VERGLEICH DER WASSERTEMPERATUR VERSCHIEDENER ZEITPERIODEN.....	37
4.3	VERGLEICH MIT UND OHNE KRAFTWERKS BETRIEB.....	40
4.4	KORRELATION DER WASSERTEMPERATUR MIT ANDEREN PARAMETERN.....	48
4.5	GROBE ABSCHÄTZUNGEN FÜR ENERGIEBILANZ UND WASSERTEMPERATUR DER RHONE.....	56
4.6	VERGLEICH MIT ANDEREN SCHWEIZER FLÜSSEN.....	59
4.7	VERGLEICH MIT REFERENZFLUSS TAGLIAMENTO.....	59
4.8	ZUSAMMENFASSUNG: WASSERTEMPERATUR VOR UND NACH KORREKTION BZW. KRAFTWERKSBAU.....	61
5	ANTHROPOGENE EINFLÜSSE AUF DEN WÄRMEHAUSHALT DER RHONE	63
5.1	ENERGIEBILANZEN.....	64
5.2	FLUSSMORPHOLOGIE / KANALISIERUNG.....	66
5.3	WASSERKRAFTWERKE.....	68
5.4	KLIMAÄNDERUNG.....	74
5.5	WEITERE ANTHROPOGENE EINFLÜSSE.....	75
5.6	ZUSAMMENFASSUNG: ENERGIEBILANZ VOR UND NACH DEM KRAFTWERKSBAU.....	76
6	VERBESSERUNGSMASSNAHMEN	78
6.1	AUSWIRKUNGEN VON TEMPERATURÄNDERUNGEN AUF GEWÄSSERORGANISMEN.....	78
6.2	GRÖSSTE DEFIZITE BEIM TEMPERATURREGIME DER RHONE.....	80
6.3	VERBESSERUNGSMASSNAHMEN.....	81
6.4	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE RHONE.....	85
6.5	ZUSAMMENFASSUNG.....	86
7	DANK.....	88
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	89
9	ANHANG.....	92
9.1	TEMPERATURMESSSTELLEN.....	92
9.2	BESTIMMUNG DER RELEVANTEN ZUFLÜSSE IN DIE RHONE.....	94
9.3	TALSPERREN IM KANTON WALLIS.....	99
9.4	ABSCHÄTZUNG DER AUSGLEICHSZEITEN VON RHONE UND SEITENBÄCHEN.....	100

1 EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE UND PROBLEMDEFINITION

Der Wärmehaushalt der Rhone ist durch (a) tiefe Temperaturen (Lage des Einzugsgebiets, Gletscher, Kraftwerke), (b) tägliche Schwankungen (natürlicher Wärmehaushalt, Kraftwerke) und (c) uniforme, homogene Bedingungen v.a. im Flussquerschnitt charakterisiert. Die tiefen Temperaturen im Sommer sind eine Folge der Schnee- und Gletscherschmelze, der Grundwasseraufstösse, der zeitlich gestaffelten Freisetzung von kaltem Tiefenwasser aus Speicherseen (Schwall/Sunk), der geringen Wasseroberfläche sowie der kurzen Aufenthaltszeiten als Folge der Kanalisierung des Flusses. Das Fehlen von thermischen Gradienten in der Breitenausdehnung der Rhone ist eine Folge der fehlenden Totwasserzonen und Altarme in der weitgehend kanalisierten Rhone. Wegen der Korrektur kommen nur kleine Variationen in der Fliessgeschwindigkeit vor und dies führt zu einer gleichförmigen Erwärmung der Rhone. Diese tiefen, uniformen und homogenen Temperaturen haben neben der kurzen Wasseraufenthaltszeit und der damit verbundenen hohen Strömung zu geringer Diversität des Zoobenthos und zu einer extrem niedrigen Diversität der Fischfauna beigetragen (Küttel et al. 2002).

Um diese ökologischen Defizite zu vermindern, sind im Rahmen der dritten Rhonekorrektur (Canton du Valais 1999, Kanton Wallis 2000) verschiedene Massnahmen geplant:

- a) Schaffung von Überschwemmungszonen (*Pfynwald*);
- b) Anbindung eines Auenwaldes (Kompensationsmassnahmen *Granges*)
- c) Ausweitungen oder Parallelgewässer zur Linderung nachteiliger Effekte des Schwallbetriebs (westlich *Riddes*).
- d) Schaffung mehrerer Flussaufweitungen

In der Rhone und ihren Seitengewässern ist die Diversität der Fischfauna gering (Küttel et al. 2002). Aufgrund der fehlenden Laichplätze deutet der Zustand der heutigen Population der Bachforellen darauf hin, dass diese in ihrer Selbsterhaltung in der Rhone stark gefährdet ist. Ohne kontinuierliche künstliche Besatzmassnahmen ist ihr Fortbestand in der Rhone in Frage gestellt.

Die Jahresamplitude der Temperatur ist gegenüber dem naturnahen Zustand vermindert. Aus Speicherseen wird kühles Tiefenwasser turbinert. Dieses turbinierte Wasser wird wegen der hydroelektrischen Nutzung nicht im natürlichen Gerinne durch Reibung erwärmt. Aufgrund der veränderten Gerinnestruktur der Rhone nähert sich die Wassertemperatur unterhalb der Wasserkraftwerke nur geringfügig der der Jahreszeit entsprechenden Gleichgewichtstemperatur an.

Eine vielfältigere Flussmorphologie würde die Aufenthaltszeit des Wassers verlängern und im Sommer das Flusswasser stärker erwärmen, die thermische Vielfalt insbesondere in den Auen erhöhen (Mosley 1983, Tockner et al. 2000) und somit aufgrund der thermischen Bedingungen wieder zusätzlichen Fischarten eine Entwicklungsmöglichkeit erlauben. Durch verbesserte Lebensräume sollen sich künftig die Bachforelle, die Groppe und karpfenartige Fische wieder natürlich vermehren. Damit sich diese jedoch fortpflanzen können, sind während der Laichzeit Wassertemperaturen von mindestens 10 bis 15°C notwendig. Dies wäre in flachen, stehenden Gewässerabschnitten problemlos möglich. Es bleibt die Frage, ob die geplanten Veränderungen des Lebensraumes ausreichen, oder ob weitere Massnahmen nötig sind, um die Temperaturverhältnisse naturnaher zu gestalten.

1.2 ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN

In diesem Bericht werden die Auswirkungen der Kanalisierung, der Lebensraumverbesserungen und der obenliegenden Wasserkraftwerke auf den Temperaturhaushalt der Rhone untersucht. Vorschläge, wie die heutigen naturfremden Temperaturverhältnisse verbessert werden könnten, stellen einen weiteren und wichtigen Bestandteil des Berichts dar.

Ein zentrales Ziel von Verbesserungsmassnahmen bei Fliessgewässern ist die Schaffung neuer Lebensräume in degradierten Flussabschnitten. Im Falle der Rhone kommen als mögliche Ursache für die äusserst geringe Diversität der Fischfauna neben der kompletten morphologischen Monotonisierung die unnatürlich tiefen und durch Schwall/Sunk-Effekte überlagerten Wassertemperaturen im Sommer in Betracht. Es soll mit diesem Teilprojekt geklärt werden, welche Rolle die Kraftwerke für das thermische Regime der Rhone spielen und welche Massnahmen eine Verbesserung bewirken könnten. Die Wiederherstellung thermischer Vielfalt in den neu-strukturierten Flussabschnitten soll eine reichhaltigere Fischfauna ermöglichen. Anhand der konkret geplanten Massnahmen soll das Potential für „thermische Lebensraumverbesserungen“ aufgezeigt werden.

Ziel dieser Studie soll sein, die drei Einflussfaktoren (natürlicher Wärmehaushalt, Zuflüsse, Kraftwerksbetrieb) für den aktuellen Ist-Zustand zu quantifizieren. Mit diesem Teilprojekt sollen die folgenden, für die Umgestaltung der Rhone relevanten Fragen beantwortet werden:

1. Wie sähe der natürliche Temperaturhaushalt der Rhone aus?

Zur Beantwortung dieser Frage sollen historische Aufzeichnungen vor dem Kraftwerksbau und Messungen aus vergleichbaren Flusssystemen wie dem Tagliamento verwendet werden.

2. Welches sind die Hauptstörungen des natürlichen Wärmehaushaltes durch menschliche Tätigkeiten?

Die verschiedenen Einflüsse sollen mit Abschätzungen quantifiziert und mit Beispielen illustriert werden. Dazu werden verschiedene zeitliche Skalen

(Mittelwerte versus kurzfristige Änderungen) insbesondere in den Seitenflüssen und in der Rhone selbst berücksichtigt.

3. Welchen Einfluss hat die Kanalisierung als eine anthropogene Veränderung der Gerinnemorphologie auf den Temperaturhaushalt der Rhone?

Mit Abschätzungen werden die Einflüsse einer Kanalisierung auf den Temperaturhaushalt der Rhone bestimmt.

4. Welchen Einfluss haben Wasserkraftwerke auf den Temperaturhaushalt der Rhone und ihrer Zuflüsse?

Mit Energiebilanzen werden die Auswirkungen der Wasserentnahmen, der Stauseen und der Wasserkraftwerke auf den Temperaturhaushalt der Rhone untersucht.

5. Gibt es weitere relevante menschliche Einflüsse auf den Temperaturhaushalt der Rhone?

Es wird überprüft, ob es neben der Kanalisierung und Wasserkraftnutzung weitere relevante anthropogene Einflüsse wie Kühlwasserzuflüsse, Wasserentnahmen und die Klimaänderung auf den Temperaturhaushalt der Rhone gibt.

6. Mit welchen Massnahmen und wie weit kann das durch die Kanalisierung und den Kraftwerksbetrieb veränderte Temperaturregime der Rhone wieder einem naturnahen Zustand angenähert werden?

Zur Diskussion stehende Massnahmen sind Aufweitungen, eine bessere Anbindung von Totarmen und Seitenflüssen, die Erstellung von Rückhaltebecken oder eines Entlastungskanals unterhalb der Wasserkraftwerke.

1.3 GLIEDERUNG DES BERICHTS

In diesem Bericht wird im zweiten Kapitel der Wärme- und Temperaturhaushalt in Flüssen vorgestellt. Dabei werden die natürlichen und die anthropogenen Einflussfaktoren aufgezählt. Im Kapitel 3 wird die Wassertemperatur der Rhone beschrieben. Dabei wird sowohl auf historische wie auch auf aktuelle Messungen des BWG eingegangen. Zusätzlich wurden innerhalb dieses Projektes weitere Sonden installiert und die Temperatur während 2 Jahren kontinuierlich gemessen. In Kapitel 4 wird die naturnahe Wassertemperatur der Rhone abgeschätzt. Es wird diskutiert, was sich in den letzten hundert Jahren geändert hat und wie sich die heutige Rhone von einem naturnahen Fluss wie dem Tagliamento unterscheidet. In Kapitel 5 wird mit einer Energiebilanz die anthropogene Beeinflussung des Wärmehaushalts der Rhone quantifiziert und diskutiert. In Kapitel 6 schliesslich werden Massnahmen vorgeschlagen, um das Temperaturregime der Rhone zu verbessern.

2 WÄRME- UND TEMPERATURHAUSHALT IN FLÜSSEN

Die Wassertemperatur von Bächen und Flüssen hängt von den folgenden Parametern ab:

- Quelltyp (zeitlich variabler Anteil an Quellwasser, Gletscherschmelze, Oberflächenabfluss)
- Gewässergeometrie
- Energieaustausch mit Atmosphäre und Sediment
- Höhenlage
- Menschliche (anthropogene) Einflüsse.

Die Wassertemperatur hängt in hohem Masse sowohl vom Messzeitpunkt wie vom Messstandort ab. Quellbäche weisen meist über das ganze Jahr konstante Wassertemperaturen auf. Bäche, welche durch Schmelzwasser von Gletschern gespeisen werden, haben im Frühsommer ihr Abflussmaximum. Direkt beim Gletscher liegt die Wassertemperatur nahe bei 0°C, flussabwärts weist sie einen deutlichen Tagesgang auf. Bei Bächen, welche v.a. durch Niederschläge gespeisen werden, spielt die Höhenlage eine wichtige Rolle und die Wassertemperaturen sind über das Jahr stark variabel.

Auf der weiteren Fliessstrecke werden die Temperaturen von Bächen und Flüssen durch den Energieaustausch über die Wasseroberfläche und durch das Sediment beeinflusst, wobei die Gerinnegeometrie und -morphologie (Wasseroberfläche, Fliessgeschwindigkeitsverteilung) grossen Einfluss haben. Die Wassertemperatur nimmt grundsätzlich mit abnehmender Höhe zu.

2.1 NATÜRLICHE EINFLUSSFAKTOREN

Die Wassertemperaturen von Bächen und Flüssen werden natürlicherweise durch den Energieaustausch über die Wasseroberfläche und mit dem Sediment sowie durch Reibungswärme beeinflusst. Wichtige meteorologische Parameter sind Sonneneinstrahlung, langwellige Ein- und Ausstrahlung, Wärmeleitung über die Wasseroberfläche und Verdunstung. Mit dem Sediment tauschen Fliessgewässer Energie durch Wärmeleitung oder durch In- und Exfiltration von Grundwasser aus. Ein Wärmehaushaltsmodell, welches alle diese Energieflüsse berücksichtigt, wurde in Meier (2002) und Meier et al. (2003) definiert und angewendet.

Temperaturregimes weisen normalerweise einen typischen Jahres- und Tagesgang auf. Als Beispiel für unbeeinflusste Wassertemperaturen werden im Kapitel 4.7 Temperaturmessungen aus dem Tagliamento, welcher nur schwach durch menschliche Tätigkeiten beeinflusst wird, angeführt (Arscott et al. 2001).

2.2 ANTHROPOGENE EINFLUSSFAKTOREN

Der Mensch beeinflusst den Wärmehaushalt von Fließgewässern direkt durch Wassereinleitungen (erwärmtes Kühlwasser von thermischen und nuklearen Kraftwerken (Meier 1996, EAWAG 1997), gereinigtes Abwasser aus Kläranlagen) und indirekt durch Entnahme und Speicherung von Wasser für die Turbinierung und allenfalls Bewässerung sowie durch Veränderung der Gerinnemorphologie (Kanalisation).

Bei der Turbinierung von Wasser wird potentielle Energie in elektrischen Strom umgewandelt. Im natürlichen Gewässergerinne würde diese Energie zur Erwärmung des Wassers führen. Diese Erwärmung kann mit der Energieerhaltung genau bestimmt werden: 0.24°C pro 100 Meter Höhenunterschied.

Im Vergleich zum Wasser in den Bergbächen führt die Speicherung des Wassers in Reservoirs wegen der grösseren Wassertiefe (im Vergleich zum Fließgewässer) und der starken Trübung trotz der längeren Exposition zu einer geringen Erwärmung des Wassers im Stausee. Einschichtungs- und Mischungseffekte in den Stauseen führen zu einem saisonalen Ausgleich der Wassertemperatur. Das Wasser wird meist aus grossen Tiefen des Stausees entnommen und ist deshalb kalt, d.h. in der Nähe der Temperatur von 4°C (maximale Dichte) bis 6.5°C .

Schwall/Sunk-Betrieb bei den Wasserkraftwerken, d.h. das kurzfristige An- und Rückfahren der Turbinen, führt zu kurzfristigen Temperaturänderungen. Bei den Messungen in der Rhone ist ein deutlicher Wochenrhythmus mit Turbinierung während der Arbeitstage und stillstehenden Turbinen während dem Wochenende sichtbar (Abbildung 8). Die zeitliche Verschiebung des Abflusses vom Sommer in den Winter trägt ebenfalls zu einem veränderten Temperaturregime bei. Auf den Restwasserstrecken wird durch die geringere Wassertiefe bei nur geringfügiger Abnahme der Wasseroberfläche normalerweise der Energieaustausch über die Wasseroberfläche vergrössert, was im Sommer zu einer höheren Erwärmung und im Winter zu einer stärkeren Abkühlung führt.

Wasserentnahmen für Bewässerungen in der Landwirtschaft können den Abfluss verringern und ebenfalls zu veränderten Wassertemperaturen führen (geringere Wassertiefe; raschere Anpassung an Atmosphäre). Änderungen in der Gerinnemorphologie (z.B. durch Kanalisation) führen durch die Veränderung der Wasseroberfläche und Vergrösserung sowie Vereinheitlichung der Fließgeschwindigkeit zu Änderungen im Wärmehaushalt. Bei schmalen Bächen kann durch eine Änderung im Uferbewuchs (wegen der Beschattung) die Wassertemperatur verändert werden. Schliesslich hat die weltweite Klimaänderung einen meist erwärmenden Einfluss auf den Wärmehaushalt von Gewässern (Hari & Güttinger, 2004).

Die Auswirkungen oben erwähnter Prozesse auf die Rhone werden im Kapitel 5 qualitativ und quantitativ beschrieben.

Tabelle 1: Auswirkungen und Zeitskalen natürlicher (1. bis 5.) und menschlicher (5. bis 10.) Beeinflussungen der Wassertemperatur von Fließgewässern¹.

Ursache	Betroffener Bereich	Zeitskala der Wirkung	Wirkung
1. Atmosphäre (Energieaustausch über Wasseroberfläche)	Ganzer Flussbereich	immer	Sinusförmige Jahreschwankungen mit überlagerten Tageschwankungen
2. Sediment (Energieaustausch über benetzte Fläche)	Ganzer Flussbereich	immer	Glättung der täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen
3. Reibungswärme	Bei Flüssen mit Gefälle grösser als 5% relevant	immer	Erhöhung der Temperatur um 0.24°C pro 100 m Höhendifferenz
4. Exfiltration von Grundwasser	Stellen mit Exfiltration von Grundwasser	v.a. Winter und Sommer	Glättung der Temperatur in Richtung Grundwassertemperatur
5. Ufervegetation (Bepflanzung oder Rodung)	bei schmalen Gewässerabschnitten	bei Sonnenschein	Beschattung führt zu kleinerer Erwärmung
6. Wasserfassung	Restwasserstrecke (Strecke unterhalb Wasserfassung bis Rückleitung des Wassers)	immer (mit Ausnahme von Überlaufsituationen, Spülungen, Revisionen)	Grössere Erwärmung im Sommer/ Abkühlung im Winter
7. Reservoir	Eingestaute Flussstrecke	Saisonal	zusätzliche Oberfläche, jedoch nur Erwärmung der obersten Schichten Speicherung von Wasser und meist Konservierung der Temperatur in der Tiefe
8. Reservoirspülungen	Strecke unterhalb Stausee	bei Spülungen und Überlaufsituationen	kurzfristiger Anstieg des Abflusses und Temperaturänderung
9. Turbinierung	Fließstrecke unterhalb Wasserrückgabe	während Turbinierung: Schwall (restliche Zeit: Sunk)	Temperaturänderung in Richtung der Temperatur des turbinierten Wassers (meist 4°C) (fehlender Energieaustausch auf Restwasserstrecke und geringe Erwärmung des Wassers durch Reibung)
10. Kanalisierung	Kanalisierte Strecke	Immer	kürzere Aufenthaltszeit, da grössere Geschwindigkeit, kleinere Temperaturvariationen über den Flussquerschnitt

¹ Die anthropogenen Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen, Wasserentnahmen für Bewässerungen und temperierte Zuflüsse wurden in dieser Tabelle nicht berücksichtigt.

3 DIE TEMPERATUR DER RHONE UND IHRER ZUFLÜSSE

Vor der Kanalisierung der Rhone liegen keine Aufzeichnungen der Wassertemperatur und vor dem Kraftwerksbau keine regelmässigen Messdaten vor. Zwei historische Messreihen (jeweils eine Messung pro Tag) aus den Jahren 1886 von Forel (1892) und 1904/05 von Uetrecht (1906) sind jedoch vorhanden. Diese Messungen widerspiegeln den Zustand der Rhone ohne Wasserkraftnutzung und ohne die Auswirkungen der zweiten Rhonekorrektur (ca. 1932 bis 1960). Bei Porte du Scex wird die Wassertemperatur der Rhone seit 1971 und bei Sion seit 1974 kontinuierlich durch die BWG/Landeshydrologie gemessen. In diesem Projekt wurde die Wassertemperatur der Rhone, ihrer wichtigsten Zuflüsse und der Kraftwerksauslässe während zweier Jahre aufgezeichnet. Die Messstellen des BWG und der EAWAG sind in der Abbildung 1 dargestellt.

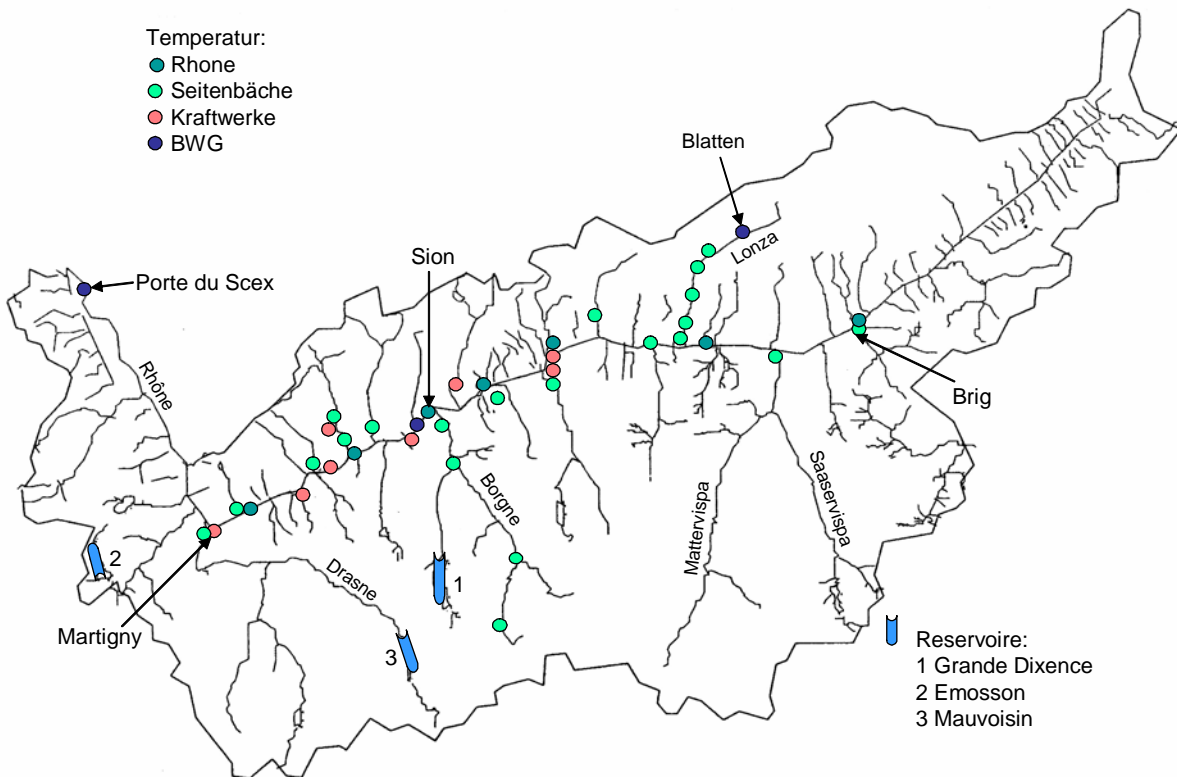


Abbildung 1: Die Rhone und ihre Zuflüsse mit Temperaturmessstellen (Kreise) und Reservoir mit Temperaturprofilen (U-Form).

3.1 HISTORISCHE AUFZEICHNUNGEN

3.1.1 Messung von Forel im Jahr 1886

Im Jahr 1886 hat François-Alphonse Forel den Abfluss und die Wassertemperatur der Rhone (zwischen der 1. und 2. Rhonekorrektur) bei Porte du Scex messen lassen (Forel 1892). Täglich wurde die Wassertemperatur tageweise am Mittag von zwei Polizisten gemessen. Die gemessenen Einzelwerte hat er zu Monatsmittelwerten zusammengefasst und in seinem Buch „Le Léman“ (1892-1901) veröffentlicht (Tabelle 2). Das Jahresmittel beträgt gemäss Forel 6.9°C, der maximal gemessene Wert 12.7°C und der minimale Wert 0°C. Die grössten Monatsmittel liegen bei 10.5°C (Mai/Juni 1886) und das kleinste bei 1.6°C (Januar 1886).

Tabelle 2: Monatsmittelwerte von Abfluss und Wassertemperatur (Messzeitpunkt jeweils 12 Uhr) der Rhone sowie Lufttemperaturen in Sion im Jahre 1886.

Monat im Jahr 1886	Abfluss im Jahre 1886 [m ³ /s]	Wassertemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]
Januar	47	1.6	-1.3
Februar	42	2.3	0.0
März	57	5.0	4.5
April	79	9.3	12.1
Mai	132	10.5	15.4
Juni	199	10.5	16.9
Juli	362	9.7	20.3
August	282	9.7	18.6
September	227	9.3	17.2
Oktober	123	8.4	11.4
November	84	4.8	5.0
Dezember	48	2.1	0.1
Jahresmittel	140.9	6.9	10.1

3.1.2 Messung von Uetrecht im Jahr 1904/1905

Erich Uetrecht liess im Rahmen einer Untersuchung zur Abtragung der Alpen (Uetrecht 1906) von April 1904 bis März 1905 bei Porte du Scex täglich verschiedene Parameter der Rhone messen, darunter auch die Wassertemperatur und die Abflussmengen (Tabelle 3). Der Abfluss wurde mit einem Limnigraphen erfasst. Zusätzlich wurde der Rhone jeden Tag eine Wasserprobe entnommen

und darin unmittelbar nach der Entnahme die Temperatur gemessen. Die Wasserentnahme fand in der Regel um 15:00 Uhr nachmittags statt.

Das „Jahresmittel“ (April 1904 bis März 1905) der Wassertemperatur liegt bei 8.9°C. Im Winter wurde ein minimales Monatsmittel von -0.23°C (Dezember 1904 und Januar 1905) gemessen. Die grössten Monatsmittel der Wassertemperaturen in den Sommermonaten liegen bei 11.1°C (Juli 1904) mit einer Maximaltemperatur von 13.5°C (27. Juli 1904).

Tabelle 3: Monatsmittelwerte der Abflussmenge und der Wassertemperatur (Messzeitpunkt jeweils 15 Uhr) der Rhone in Porte du Scex sowie Lufttemperatur in Villeneuve von April 1904 bis März 1905.

Monat	Abflussmenge [m ³ /s]	Wassertemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]
April 1904	149.1	9.7	10.7
Mai 1904	314.3	10.8	14
Juni 1904	520.2	10.2	17.6
Juli 1904	491.5	11.1	20.7
August 1904	378.1	9.6	18.1
September 1904	181	8.8	13
Oktober 1904	82.1	8.4	9
November 1904	44.6	7.3	3.8
Dezember 1904	37	-0.23	1.4
Januar 1905	35.5	-0.23	-1.3
Februar 1905	24.9	2.0	1
März 1905	32.9	6.4	5.8
Mittelwert	191.9	7.0	9.5

3.2 LANGZEITMESSUNGEN DES BWG

Die Landeshydrologie (LHG) (seit 2001 integriert im BWG - Bundesamt für Wasser und Geologie) misst die Abflussmengen der Rhone seit 1916 in Porte du Scex. Die Abflusswerte der Periode 1916 bis 1934 wurden von der Landeshydrologie zusammengefasst, da nachher mit dem Bau der ersten grossen Wasserkraftwerke begonnen wurde und die Abflussmengen dadurch beeinflusst wurden. Die Wassertemperatur der Rhone wird in Porte du Scex seit 1971, in Sion seit 1974 und in der Lonza bei Blatten seit 1987 gemessen. Tabelle 4 fasst die gemessenen Daten bei Porte du Scex zusammen. Die Jahresmittel vor und nach dem Bau der Wasserkraftwerke sind vergleichbar. Das Jahresmittel der Wassertemperatur der Periode 1971 bis 2002 liegt bei 7.1°C, wobei im Juli 1996 mit 14.1°C die höchste und im Januar 1971 mit 0.7°C die tiefste Wassertemperatur dieser Periode gemessen wurde.

Tabelle 4: Kenndaten der Rhone bei Porte du Scex

Porte du Scex	Abfluss [m³/s] 1916-1934	Abfluss [m³/s] 1935-2002	Temperatur [°C] 1971-2002
Jahresmittelwert	184	183	7.1
Grösstes Jahresmittel (Jahr)	207 (1931)	227 (1999)	7.8 (1996)
Kleinstes Jahresmittel (Jahr)	142 (1925)	127 (1976)	6.7 (1983)
Maximalwert (Monat & Jahr)	1030 (Aug. 1914)	1370 (Okt. 2000)	14.1 (Jul. 1996)
Min. Tagesmittel (Monat & Jahr)	30.8 (Jan. 1922)	33.8 (Feb. 1942)	0.7 (Jan. 1971) ²

In der Abbildung 2 sind die Ganglinien der Wassertemperatur für eine Woche (jeweils von Montag bis Sonntag) im Sommer 2001 bzw. im Winter 2001 abgebildet. Die Tage sind in den Abbildungen jeweils von Mitternacht (Datumsangabe) zur nächsten Mitternacht (Datumsangabe des folgenden Tages) aufgezichnet. Am 6.7.2001 wurde das höchste, am 24.12.2001 das tiefste Tagesmittel der Lufttemperatur im Jahre 2001 gemessen (mündliche Mitteilung der MeteoSchweiz). Auch während der heissesten Woche des Jahres 2001 beträgt die Tagesamplitude bei der Wassertemperatur nur 2.5°C (Abbildung 2, oben). Im Winter ist der Einfluss der Wasserkraftnutzung deutlich sichtbar, wie die ausgewählte Woche aus dem Jahr 2001 (Abbildung 2, unten) illustriert. Die steilen Flanken im Winter sind eine Folge des An- oder Abfahrens von Turbinen (Schwall/Sunk). Bis Donnerstag wurde viel Wasser turbinert. Die Wassertemperatur steigt bei Anfahen der Turbinen um bis zu 2°C. Am Sonntag, 24.12.2004, stehen die Turbinen still und durch den Kaltlufteinfluss sinken die Temperaturen auf sehr tiefe Werte von 0.5°C.

² Momentanwert

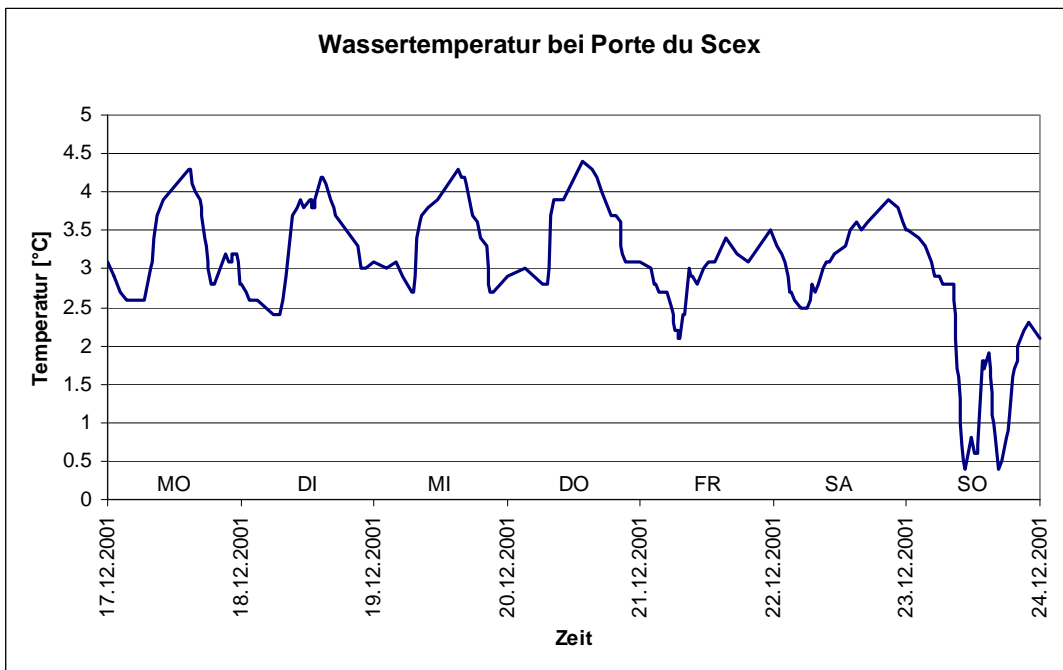
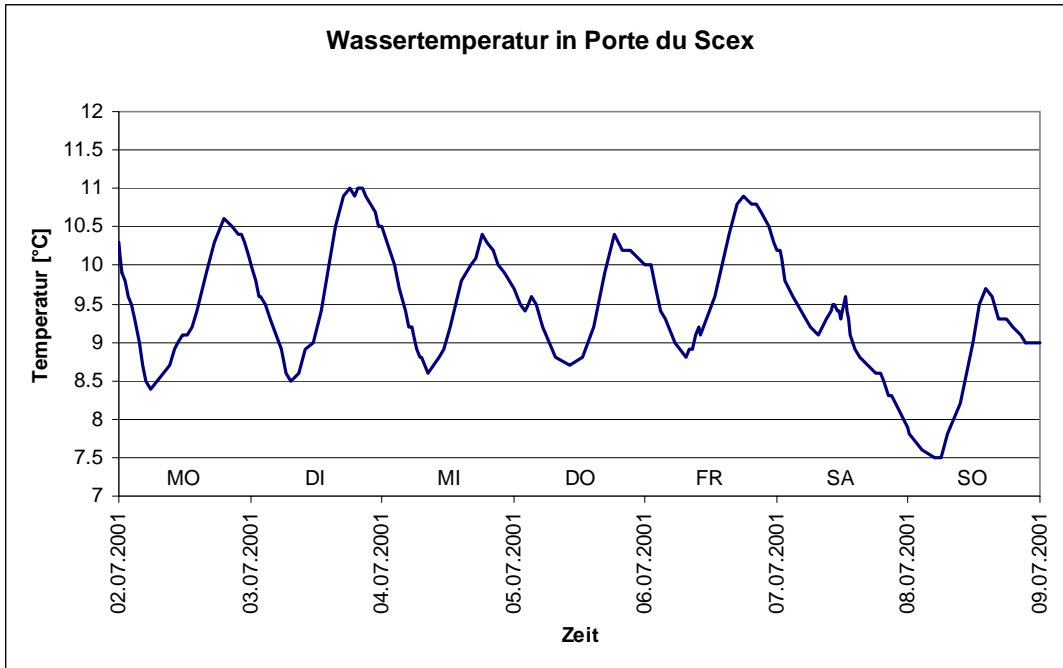


Abbildung 2: Wassertemperaturen in Porte du Scex vom 2. bis 9.7.2001 bzw. 17. bis 24.12.2001 (zwei Wochen mit sehr hohen bzw. sehr tiefen Lufttemperaturen).

3.3 MESSUNGEN DER EAWAG VON 2001 BIS 2003

Im Juni 2001 wurden zwischen Brig und Martigny 37 Temperaturlogger an insgesamt 30 Stellen in der Rhone, in ihren Zuflüssen sowie in Kraftwerksauslässen gesetzt (Liste im Anhang 9.1). Die Zuflüsse und Kraftwerksauslässe wurden aufgrund von Abflussdaten ausgewählt; die Untersuchungsstellen in der Rhone aufgrund ihrer Lage relativ zu den grossen Zuflüssen (Anhang 9.2). Zur Untersuchung von Temperaturvariationen im Querschnitt und für eine Verminderung fehlender Daten durch Vandalenakte und Trockenfallen der Messstellen wurden in der Rhone jeweils auf beiden Ufern Temperaturlogger exponiert (Bezeichnung L und R für orographisch links und rechts). Im Rahmen einer Diplomarbeit (Frey 2003) wurden bei den Seitenbächen La Borgne und Lonza 7 resp. 6 Temperaturlogger im Sommer 2002 (19.6. und 13./14.8.) exponiert.

Bei den Temperaturloggern handelt es sich um Logger der Firma VEMCO welche in einem Metallgehäuse eingefasst und mit einer Kette am Ufer befestigt wurden. Es wurden zwei verschiedene Loggertypen (8 Bit und 12 Bit) mit unterschiedlicher Auflösung verwendet. Die folgende Tabelle fasst die Eigenschaften der 2 Loggertypen zusammen.

Alle Logger wurden vorgängig kalibriert und so programmiert, dass sie die Wassertemperatur alle 15 Minuten messen (in Seitenbächen alle 20 Minuten) und intern abspeichern. Alle zwei Monate wurden die Logger ausgewechselt und die Daten ausgelesen. Die Temperaturdaten wurden als Text- und Matlab-Dateien gespeichert und grafisch als Zeitreihen dargestellt (Anhang 9.5, separater Ordner in der Bibliothek der EAWAG Kastanienbaum).

Tabelle 5: verwendete Temperaturlogger und ihre Eigenschaften

Loggertyp	Temperaturbereich	Auflösung	Genauigkeit
8 Bit	-4°C bis +20°C	±0.1°C	±0.2°C
12 Bit	-5°C bis +40°C	±0.01°C	±0.02°C

3.3.1 Messungen in den Seitenbächen

Das Wasser aller grossen Rhonezuflüsse zwischen Brig und Martigny wird gefasst und turbinert. Meist wird das Wasser knapp unterhalb der Gletscher abgeleitet. Das kalte, trübe Gletscherwasser gelangt so in ein Reservoir oder wird direkt turbinert.

Der Abfluss unterhalb der Wasserfassungen ist stark verringert oder gleich Null. Seitliche Zuflüsse auf der Restwasserstrecke bringen wieder Wasser mit einer oft unterschiedlichen Wassertemperatur, sofern sie nicht selber gefasst sind. Durch die verminderte Abflussmenge in der Restwasserstrecke ist ihr Einfluss auf die Mischtemperatur grösser als im ungenutzten Zustand.

Bei den grösseren Seitenbächen wurde die Wassertemperatur vor der Mündung in die Rhone, bei den Seitenbächen Borgne und Lonza an mehreren Stellen gemessen (Anhang 9.1 und Frey 2003).

Bei einigen Seitenbächen wird das turbinierte Wasser (oder ein Teil davon) vor der Mündung in die Rhone zurückgeleitet (Saltina, Vispa, Lonza, Dala, Borgne, Lizerne, Dranse), bei anderen wird es direkt in die Rhone (Navisance, Lienne, Borgne) oder in ein anderes seitliches Einzugsgebiet (Gamsel, Borgne, Morge, Dranse) übergeleitet. Die Morge, bei der die Wassertemperaturen im Sommer wegen Ausfalls eines Temperaturloggers leider fehlen, weist deutlich höhere Wassertemperaturen auf als die durch Schwall/Sunk-beeinflussten, sonst aber vergleichbaren Bäche Lizerne und Lonza (Abbildung 3).

Bei der oben genannten ersten Gruppe gibt es neben der Restwasserstrecke auch eine Schwall/Sunk-Strecke vor der Mündung in die Rhone, deren Auswirkungen auf die Wassertemperatur in der Abbildung 4 v. a. bei der Lonza und der Vispa gut erkennbar sind. Das Wasser in der Restwasserstrecke der Morge ist während der Arbeitstage Montag bis Mittwoch (mit Turbinierung) deutlich wärmer als dasjenige der Schwall/Sunk-Strecken von Dranse oder Lonza, welche am Wochenende vergleichbare Wassertemperaturen aufweisen. Die Temperaturgänge der Vispa und der Lonza werden durch kurzfristige Temperaturänderungen geprägt.

Bei der Lizerne wird das auch oberhalb des Kraftwerks Ardon an Arbeitstagen durch Kraftwerksbetrieb veränderte Temperaturregime durch den Zufluss beim Kraftwerk Ardon noch zusätzlich beeinflusst (Abbildung 5). Bei Schwall (auch am Wochenende) werden die Wassertemperaturen unterhalb des Kraftwerks deutlich abgesenkt, während bei Sunk Wasser in die Lizerne gelangt, welches langsamer abfließt und sich deshalb stärker erwärmt. Mit einer Verzögerung von einigen Stunden führt das Abfließen dieses Wassers zu zeitlich verschobenen Temperaturmaxima in den frühen Morgenstunden. Die Wassertemperaturen vor und nach dem Wasserkraftwerk Ardon sind deutlich verschieden.

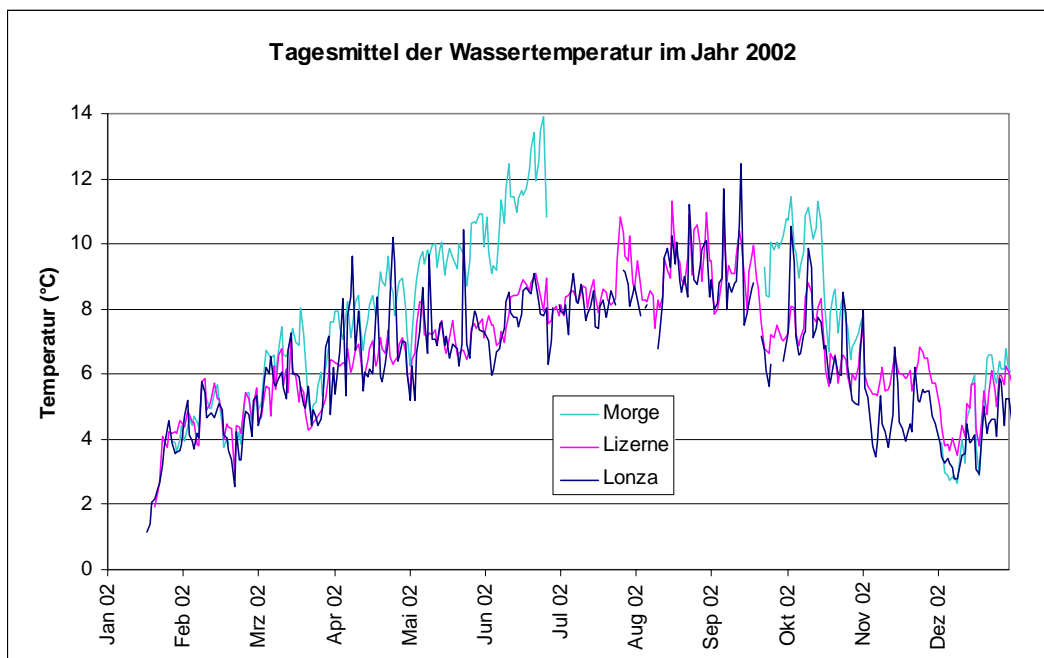


Abbildung 3: Tagesmittelwerte der Wassertemperatur der Seitenflüsse Lonza, Morge und Lizerne.

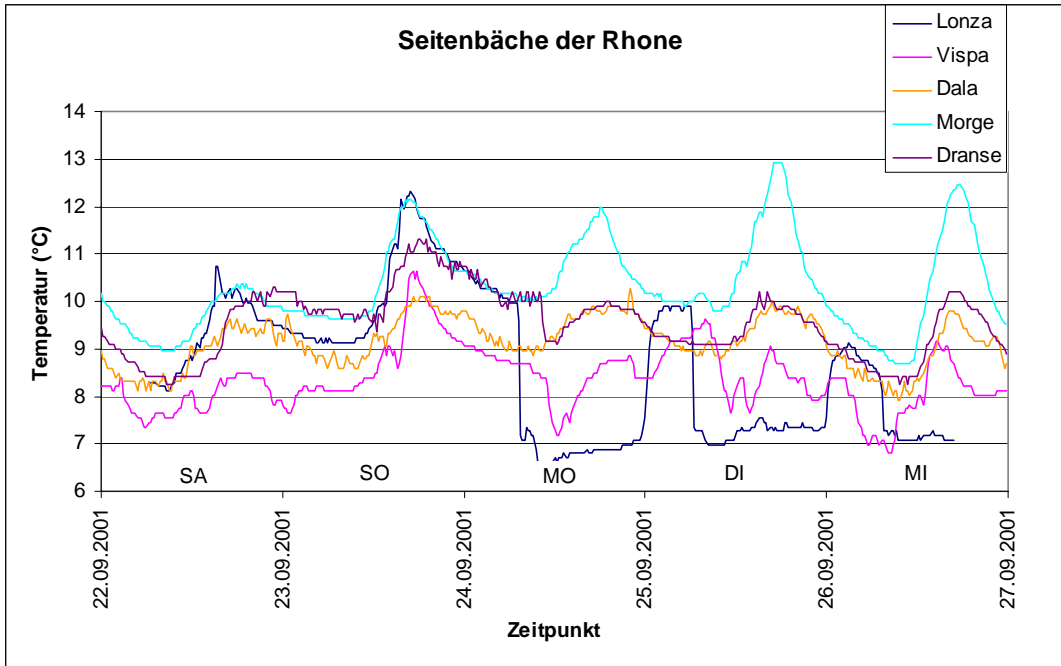


Abbildung 4: Wassertemperaturen verschiedener Seitenbäche der Rhone von Samstag, 22.9.2001, bis Mittwoch, 26.9.2001.

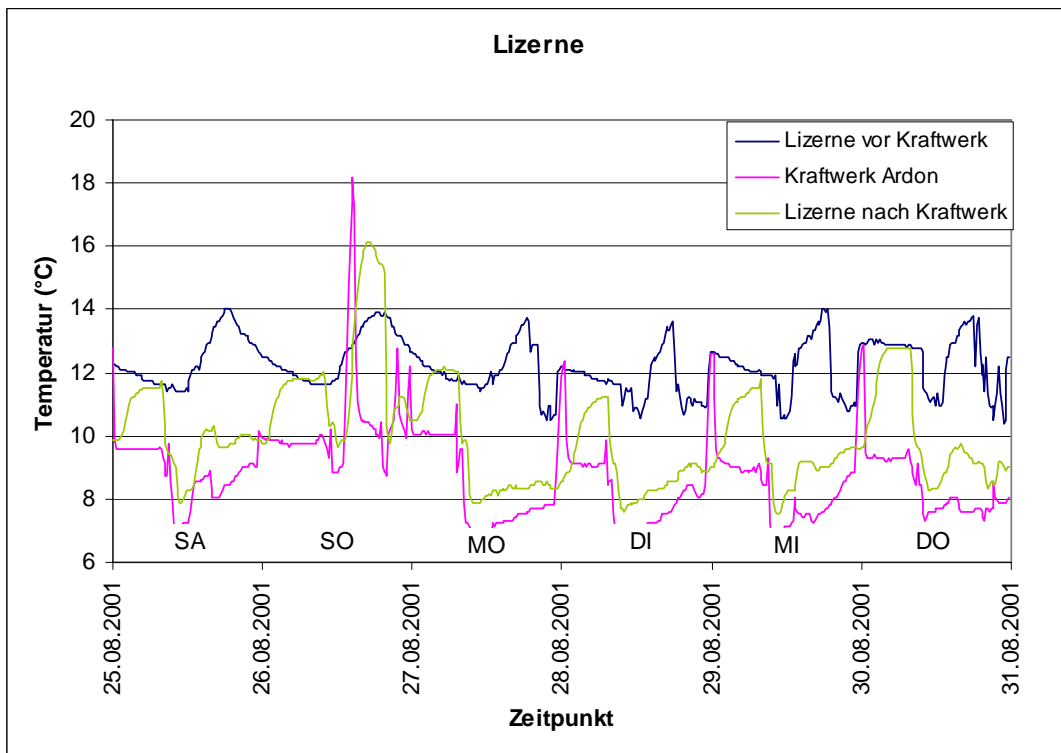


Abbildung 5: Wassertemperaturen der Lizerne vor und nach dem Kraftwerk Ardon und die Auslasstemperatur beim Kraftwerk Ardon. Der kühlere Kraftwerksauslass senkt die Temperatur der Lizerne nach dem Kraftwerk ab.

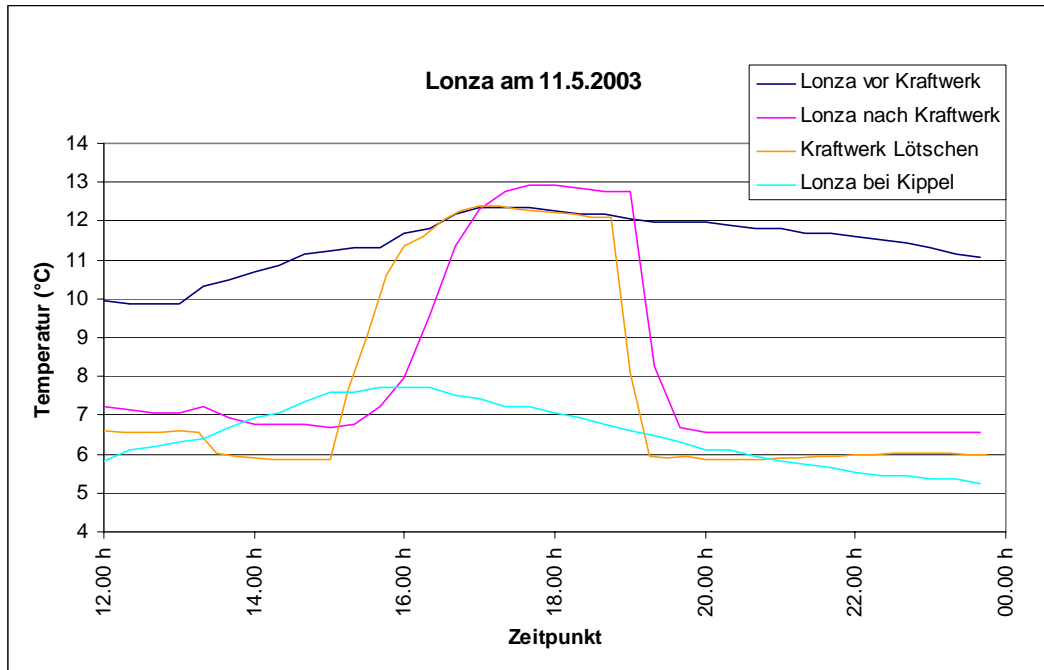


Abbildung 6: Wassertemperaturen der Lonza vor und nach dem Kraftwerk Löttschen, beim Kraftwerksauslass und in Kippel (unbeeinflusster Vergleichswert). Auf der Restwasserstrecke zwischen Kippel und dem Wasserkraftwerk Löttschen erwärmt sich das Wasser um mehr als 4°C. Das kalte turbinierete Wasser kühlt die Lonza nach dem Kraftwerk ab. Während der Nachmittagsstunden von 15 bis 19 Uhr steht die Turbine still (warmes Restwasser fließt zur Messstelle beim Kraftwerk) und nach dem Kraftwerk erwärmt sich das Wasser noch zusätzlich.

Die Messungen an der Lonza (Frey 2003) illustrieren den Einfluss der Wasserkraftwerke auf die Wassertemperatur exemplarisch. Das Modell von Frey „zeigt bei einer hydroelektrischen Nutzung am Ende der 7.5 km langen Restwasserstrecke (5% der natürlichen Wassermenge) der Lonza eine gegenüber dem unbeeinflussten Zustand im Mittel um 3.1°C erhöhte Wassertemperatur. Dies entspricht der Temperaturerhöhung in der Abbildung 6 zwischen Kippel und der Messstelle vor dem Wasserkraftwerk. Nach der Rückleitung des kühlen Kraftwerkswassers, kurz vor der Einmündung in die Rhone, kehren sich die Temperaturverhältnisse um und die Temperatur im hydraulisch genutzten Fluss ist durchschnittlich um 1.2- 1.4°C kühler, als dies ohne Eingriffe der Fall wäre“ (Frey 2003). Es tritt also neben der Temperaturänderung ein weiterer unnatürlicher Effekt auf: eine plötzliche Abkühlung des Wassers unterhalb des Kraftwerkes während der Turbinierungszeiten (Messstelle „Lonza nach Kraftwerk“ in der Abbildung 6).

3.3.2 Messungen in der Rhone

In der Abbildung 7 ist die Wassertemperatur der Rhone im Längsverlauf für verschiedene Monate aufgetragen. Dargestellt sind diejenigen Monate, für welche die Messdaten am vollständigsten waren. Die Wassertemperatur steigt zu allen Zeiten mit der Fließstrecke tendenziell an, im oberen Teil zwischen Brig und Sierre am stärksten. Unterhalb von Sierre und Nendaz gibt es zeitweise eine Temperaturreduktion. Bei Sierre, wo aufgrund der schwierigen Messbedingungen die Monatsmittel von Februar 2002 und Oktober 2002 fehlen, ist diese auf die Erwärmung der Rhonetemperatur auf der Pfywaldstrecke (oberhalb der Messstelle) und die Rückleitung des bei Leuk entnommenen Wassers (unterhalb der Messstelle) zurückzuführen. Unterhalb von Nendaz wird kaltes turbinertes Wasser von den grossen Kraftwerken eingeleitet, was mit Ausnahme von Februar 2003 zu einer Abkühlung der Rhonetemperatur führt.

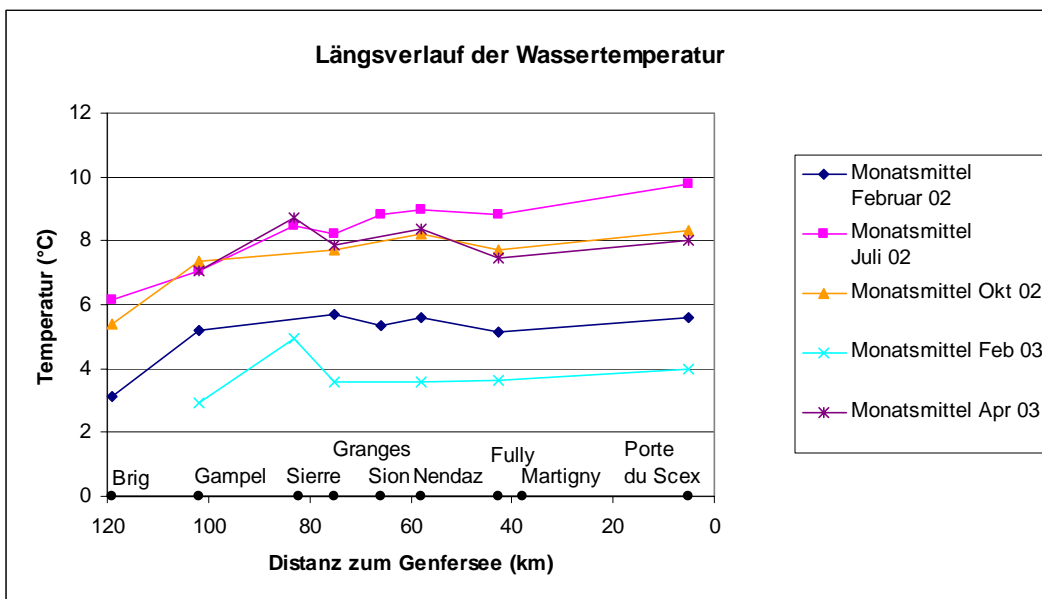


Abbildung 7: Wassertemperatur der Rhone im Längsverlauf

Die gemessenen Mittelwerte und Extrema einiger EAWAG-Messstellen und der BWG Messstationen sind in der Tabelle 6 enthalten. Zwischen den EAWAG- und den BWG-Messungen der Extremwerte in Sion gibt es Unterschiede, welche auf die genaue Lage der Messstelle (Flussseite, Wassertiefe) zurückzuführen sind. Die Jahresmittelwerte 2002 stimmen jedoch sehr gut überein. Die Mittelwerte, welche zwischen 4.7 und 7.6°C liegen, steigen mit Ausnahme des Wertes in Fully in Fließrichtung an. Der kälteste Tag dieses Jahres bezüglich Wassertemperatur war der 2. Januar 2002 mit Temperaturen zwischen -0.1 und 2.2°C. Die höchsten Wassertemperaturen wurden bei den meisten Messstellen am 21. April 2002 gemessen (mit Werten zwischen 10.4 und 12.9°C). Im Sommer, wenn eigentlich die höchsten Werte erwartet werden würden, fließt viel kaltes Wasser von der Schneeschmelze und aus der Tiefe der Stauseen in die Rhone.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Wassertemperaturen der Rhone an verschiedenen Messstellen (inkl. BWG) mit Durchschnittswert sowie Minimal- und Maximalwert im Jahre 2002.

Messstelle	Mittelwert 2002 [°C]	Minimum [°C] (Datum)	Maximum [°C] (Datum)
Brig	4.65	-0.13 (2.1.2002)	10.4 (17.6.2002)
Gampel	6.28	0.59 (2.1.2002)	12.5 (21.4.2002)
Granges	7.19	2.42 (2.1.2002)	12.5 (21.4.2002)
Sion	7.44	1.04 (2.1.2002)	11.9 (21.4.2002)
Sion BWG	7.4	0.2 (2.1.2002)	12.3 (21.4.2002)
Nendaz	7.41	0.08 (2.1.2002)	12.4 (21.4.2002)
Fully	7.08	1.05 (1.1.2002)	12.7 (28.7.2002)
Porte du Scex BWG	7.6	1.4 (2.1.2002)	12.9 (28.7. & 18.8.2002)

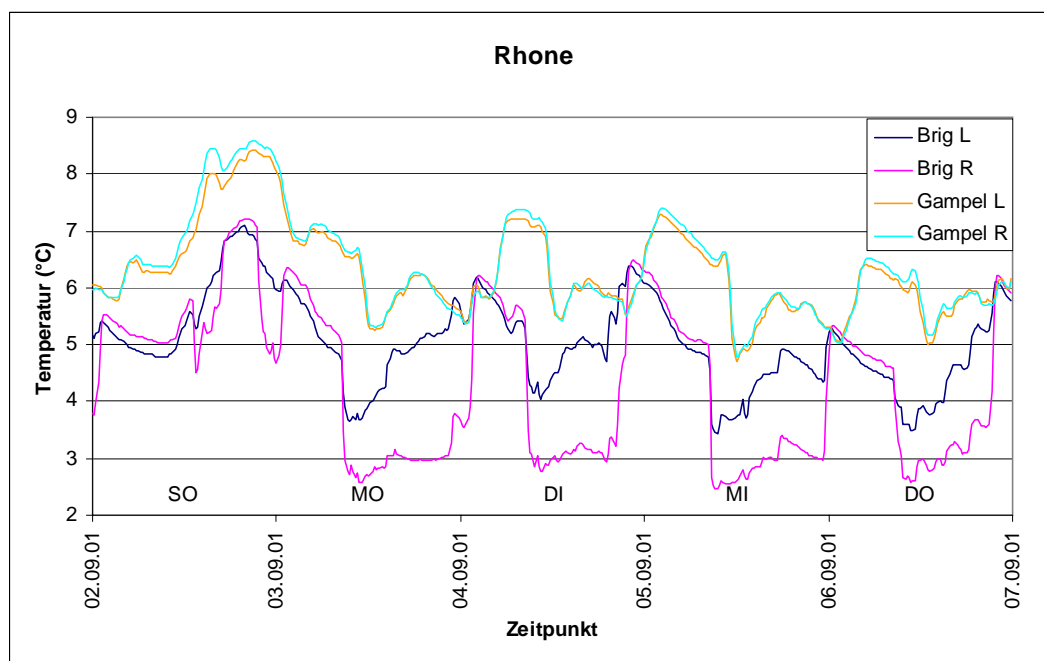


Abbildung 8: Wassertemperatur der Rhone bei Brig und Gampel von Sonntag, 2.9. bis Donnerstag, 6.9.2001.

In der Abbildung 8 sind Effekte der Kraftwerksnutzung auf die Wassertemperatur an verschiedenen Stellen in der Rhone bei Brig aufgezeichnet. Bei der rechten Messstelle bei Brig (Brig R) ist deutlich der Einfluss durch die flussaufwärts einmündende und durch die Kraftwerksnutzung beeinflusste

Massa erkennbar. Aber auch die linke Seite (Brig L) wird durch Schwall und Sunk-Ereignisse beeinflusst, jedoch in geringerer Masse. Bei Gampel, wo die Wassertemperaturen durch die Erwärmung auf der Strecke auf einem höheren Niveau liegen, erscheinen die Auswirkungen später und leicht gedämpft.

3.3.3 Messungen in den Reservoiren

Die ausführlichen Resultate der Messkampagne sind im Bericht von Frey et al. (2003a) zu finden.

Temperaturprofile in den drei grössten Stauseen

Im Sommer 2002 und 2003 wurden in den drei Stauseen Grande Dixence, Mauvoisin und Emosson zu drei Zeitpunkten Temperaturprofile erstellt.

Grande Dixence: 20.8.2002, 26.6.2003, 2.9.2003 (CTD-Sonde SBE 19)

Mauvoisin: 21.8.2002, 26.6.2003, 2.9.2003 (CTD-Sonde RBR XR-420)

Emosson: 21.8.2002, 26.6.2003, 2.9.2003 (CTD-Sonde RBR XR 420)

Wassertemperaturmessungen

Grande Dixence: Im Juni und im August nahm die Temperatur in den obersten 5 m nach oben hin zu, im September nur innerhalb des obersten Meters. Es zeigen sich im Jahr 2003 annähernd konstante Temperaturen unterhalb von 20 m Tiefe (4.3°C im Juni, 4.8°C im September), im Jahre 2002 nahm die Temperatur unterhalb von 20 m (4.3°C) bis 90 m Tiefe (4.7°C) leicht zu.

Mauvoisin: Die Temperatur ist in der gesamten Wassersäule annähernd konstant ($6 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

Emosson: Die Wassertemperatur liegt an der Oberfläche zwischen 12.5 und 16°C. In allen Profilen nimmt die Temperatur innerhalb 25 m auf 4°C ab. Unterhalb von 25 m Tiefe wurde jedes Mal eine Temperatur von ca. 4°C gemessen, welche entlang der Temperatur der maximalen Dichte³ mit der Tiefe leicht abnimmt.

³ Die Temperatur maximaler Dichte ist diejenige Temperatur, bei der das Wasser unter den herrschenden Druckverhältnissen die maximale Dichte aufweist.

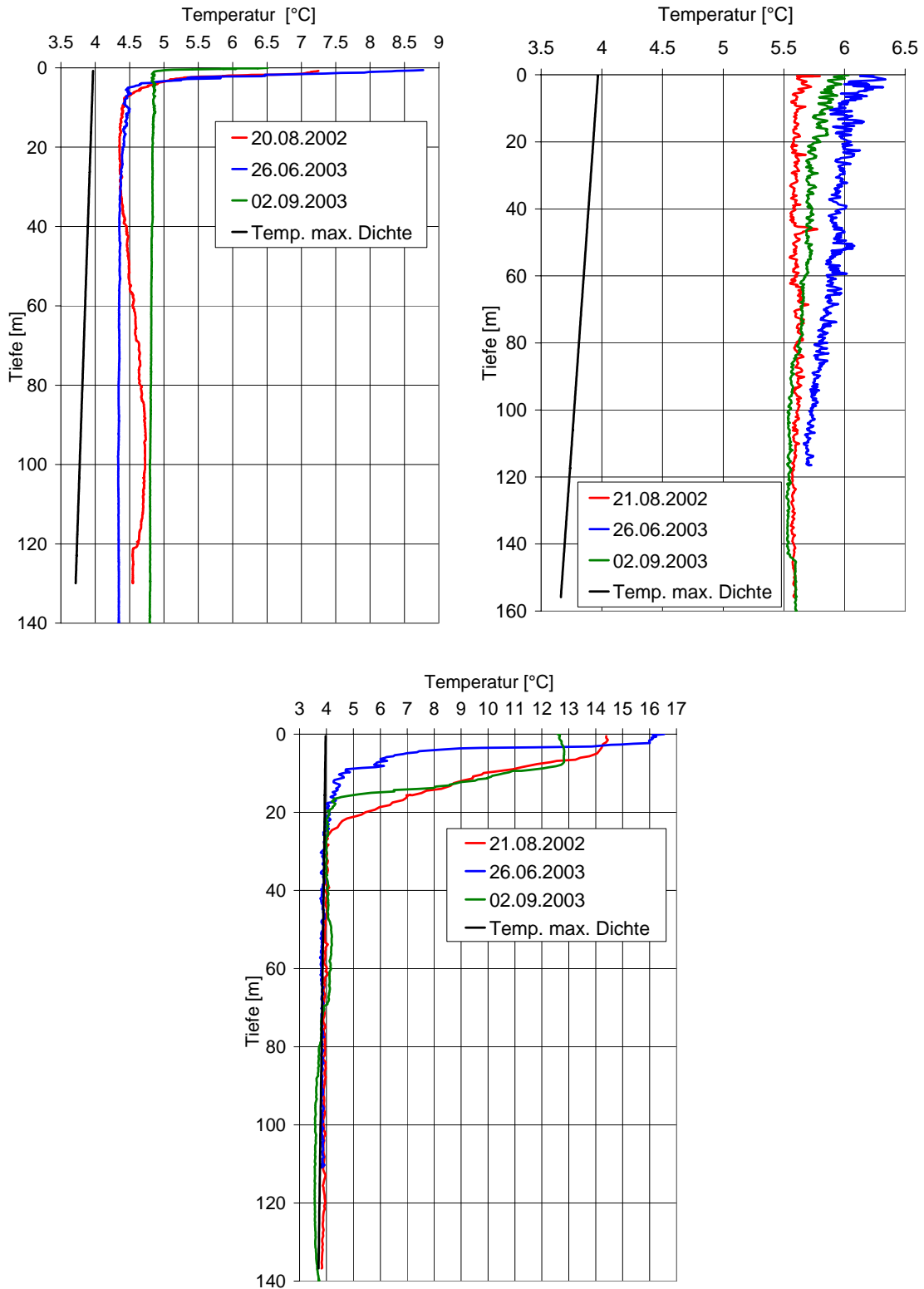


Abbildung 9: Die Temperaturen im Stausee Grande Dixence (oben links), Mauvoisin (oben rechts) und Emosson (unten).

Wärmeinhalt

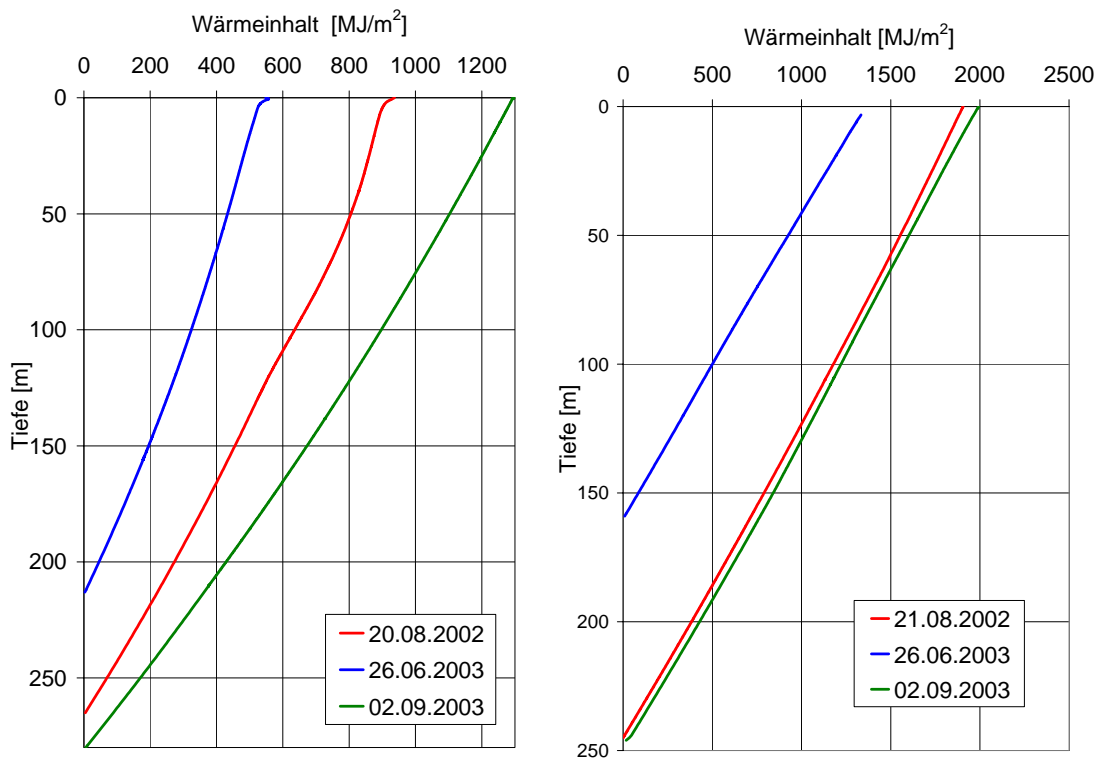
Der Wärmeinhalt entspricht der im Reservoir von unten nach oben integrierten Wärmemenge pro Quadratmeter bei der Staumauer. Die Referenztemperatur liegt bei der Temperatur maximaler Dichte.

Grande Dixence: August 2002: 900 MJ/m^2 , im Juni 2003 war der Wärmeinhalt wegen der tiefen Füllung geringer, im September 2003 entsprechend höher.

Mauvoisin: August 2002 und September 2003: ca. 2000 MJ/m^2 . Juni 2003: ca. 1300 MJ/m^2 (geringere Füllhöhe)

Emosson: Der Wärmeinhalt unterhalb von 20 m Tiefe ist aufgrund der niedrigen Temperatur sehr gering. Insgesamt ergibt sich im August 2002 ein Wärmeinhalt von 600 MJ/m^2 , im Juni 2003 von 250 MJ/m^2 und im September 2003 von 450 MJ/m^2 . Da am 2. September 2003 in einer Tiefe von 120 bis 40 m die Wassertemperatur sogar unter der Temperatur maximaler Dichte liegt, ist der Wärmeinhalt in diesem Bereich negativ.

Neben der Temperatur und dem Wärmeinhalt wurden an diesen Tagen auch Sauerstoffgehalt (nur Grande Dixence), Licht-Transmission (nur Grande Dixence) und Leitfähigkeit sowie Partikelkonzentrationen gemessen und daraus die Dichte berechnet. Die Resultate sind im Stauseebericht (Frey et al. 2003a) zu finden.



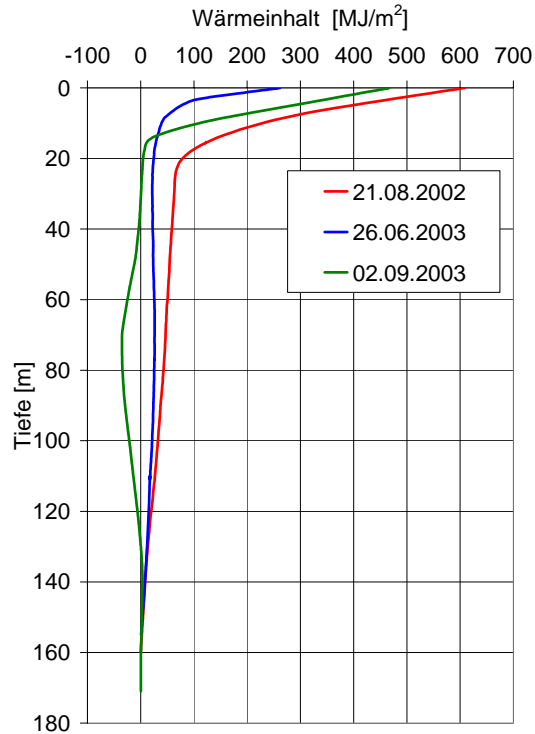


Abbildung 10: Nach oben integrierter Wärmeinhalt pro Fläche der Stauseen Grande Dixence (oben links), Mauvoisin (oben rechts) und Emosson (unten).

Interpretation

- Grande Dixence: Die tiefen Temperaturen sind einerseits auf das Einzugsgebiet des Stausees (trübes Gletscherwasser) und andererseits auf die grosse Höhe zurückzuführen, wo die Lufttemperaturen auch im Sommer tief bleiben. Die Schwebstoffkonzentration liegt bei rund 80 mg l^{-1} .
- Mauvoisin: Die tiefen Temperaturen sind auf die grosse Trübung (Schwebstoffkonzentration zwischen 58 und 74 mg l^{-1}) und die grosse Höhe zurückzuführen. Die Sonnenstrahlung dringt nicht weit in den See ein. Die konstante Temperatur in der Tiefe deutet darauf hin, dass der See während der Mischungsphase (Frühling) nur wenig gefüllt war und die Zuflüsse ihn mit 5.5°C warmen Wasser wieder auffüllten.
- Emosson: Die Erwärmung in den obersten Schichten kommt durch die Sonneneinstrahlung zustande. Die kurzwellige Strahlung kann relativ weit in den See eindringen, da er mit Schwebstoffkonzentrationen zwischen 3 und 5 mg l^{-1} klar ist.

3.3.4 Auslasstemperaturen der Kraftwerke

Zur Bestimmung der Reservoirtemperaturen wurden die gemessenen Daten der jeweiligen Kraftwerksauslässe analysiert. Wird Wasser direkt aus einem Speichersee turbinert, so kann aufgrund der konstanten Temperatur im unteren Bereich des Sees, wo das Wasser normalerweise entnommen wird, auch eine konstante Auslasstemperatur gemessen werden. Wird die Turbinierung gestoppt, fliesst beim Kraftwerksauslass kein Wasser mehr und der Temperaturlogger misst die im Tagesgang deutlich schwankende Lufttemperatur oder die Temperatur des zurücklaufenden Wassers des Hauptflusses. Das Temperaturregime des turbinerten Wassers ist normalerweise deutlich anders ausgeprägt als das natürliche Regime und so können die Tagesabschnitte bestimmt werden, während derer Wasser turbinert wurde. Daraus können die Auslasstemperatur und – über den Wirkungsgrad und die Leistung des jeweiligen Kraftwerkes – auch die Reservoirtemperatur bei der Wasserentnahmestelle bestimmt werden.

Im Wallis wird das Herauslesen der Auslasstemperatur durch verschiedene Faktoren erschwert: Meist liegt oberhalb des Kraftwerkes nicht nur ein Stausee, sondern es wird auch Wasser aus kleineren Reservoirs oder Wasserfassungen direkt turbinert. Als Temperatur resultiert eine Mischtemperatur zwischen Fluss- und Stauseewasser. Zur Bestimmung der Reservoirtemperatur wurde jeweils versucht, während einer Winterwoche mit ständiger Turbinierung eine Anfangstemperatur zu bestimmen. Von diesem Temperaturniveau aus wurde die – über die Zeitdimension von einer Woche nicht oder höchstens sehr schwach variierende – Temperatur während der restlichen Wochen bestimmt. Meist konnten längere Abschnitte (mindestens $\frac{1}{2}$ Tag) erkannt werden, während derer eine konstante Temperatur gemessen wurde und die nur wenig von der für die vorherige Woche bestimmten Temperatur abwich. Da die Temperaturen in den Stauseen höchstens im Frühling bei niedriger Füllmenge kurzfristig mehr als 0.5°C schwanken, kann davon ausgegangen werden, dass die relativ konstanten Werte der Temperatur im Stausee entsprechen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 11, zusammen mit der Temperatur der Monatsmittel der Rhone bei Granges dargestellt. Für die Bestimmung der Auslasstemperatur bei Laufkraftwerken wurde alle 5 Tage von Auge ein Tagesmittelwert festgelegt (Abbildung 12).

Die Auslasstemperatur der Laufkraftwerke, welche der Temperatur der genutzten Flüsse entspricht, schwankt im Tages- und Jahresverlauf stärker als die Auslasstemperatur der Speicherkraftwerke, bei denen es von Speichersee zu -see in den Sommermonaten grosse Unterschiede gibt. Aus diesem Grund ist der Effekt von Speicherkraftwerken auf die Wassertemperatur deutlich grösser als derjenige von Laufkraftwerken.

Die Differenz zwischen der Auslasstemperatur der Kraftwerke Riddes/Fionnay (Mauvoisin), La Batiaz (Emosson) und Chandoline (Grande Dixence) und der entsprechenden Temperaturmessungen an den tiefsten Punkten der Stauseen (Temperaturprofile aus Kapitel 3.3.3) entsprechen ziemlich genau dem Wärmeverlust der Wasserkraftwerke, welcher durch den Wirkungsgrad bestimmt wird. Diese Abwärme wurde mit Hilfe der Energieerhaltung aus der nutzbaren Fallhöhe der Kraftwerke, der bekannten Erwärmung von 0.24°C pro 100 m Höhendifferenz

und einem Wirkungsgrad von 78% für Chandoline, 82% für Riddes und 85% für La Batiatz (Kanton Wallis: <http://www.vs.ch/Home2/forcehydro/>) berechnet. Die grössten Abweichungen treten beim Kraftwerk Riddes auf. Ein Grund für die Diskrepanz liegt möglicherweise in der Turbinierung von zusätzlichem Wasser aus anderen Reservoiren und Wasserfassungen, was auch bei Chandoline möglich ist.

Tabelle 7: Vergleich der Auslasstemperaturen der Kraftwerke Mauvoisin, Emosson und Grande Dixence mit den Temperaturprofilen (Wassertemperatur an der tiefsten Stelle) der Stauseen Mauvoisin, Emosson und Grande Dixence.

Wassertemperaturen [°C]	T-Profil 20. bzw. 21.8.02	T-Profil 26.6.03	T-Profil 2.9.03
Kraftwerk Chandoline (1740 m)	-	5.2	5.5
Reservoir Grande Dixence	4.3	4.5	4.8
Differenz	-	0.7	0.7
T-Erhöhung durch Abwärme	0.9	0.9	0.9
Kraftwerk Riddes (1440 m)	6.5	6.7	6.6
Reservoir Mauvoisin	5.6	5.7	5.6
Differenz	0.9	1.0	1.0
T-Erhöhung durch Abwärme	0.7	0.7	0.7
Kraftwerk La Batiatz (660 m)	4.3	4.1	3.9
Reservoir Emosson	3.9	3.8	3.7
Differenz	0.4	0.3	0.2
T-Erhöhung durch Abwärme	0.3	0.3	0.3

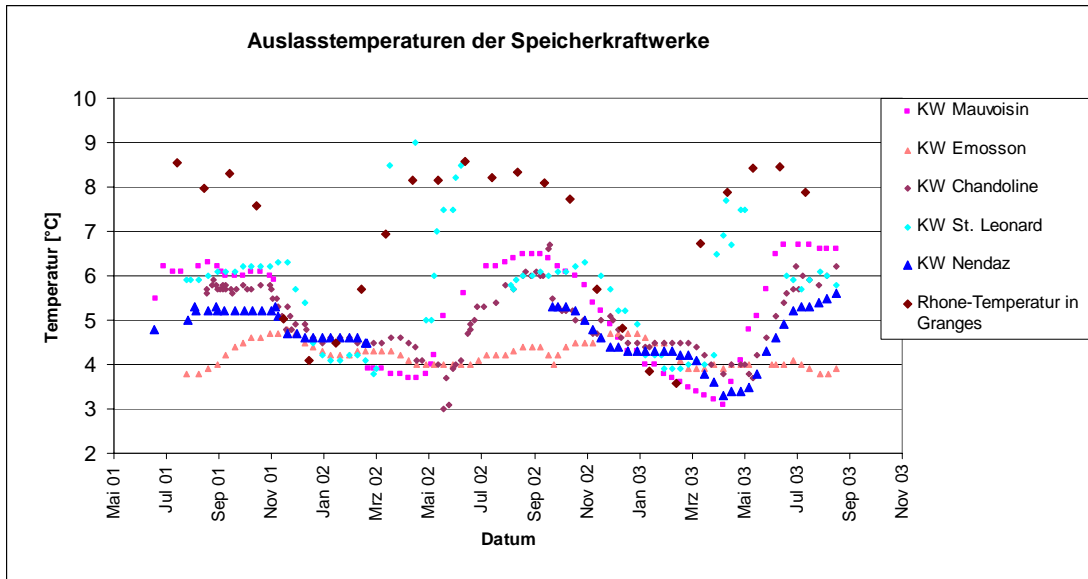


Abbildung 11: Auslasstemperaturen der Speicherkraftwerke (Messung beim Kraftwerksauslass) und Rhonetemperatur bei Granges.

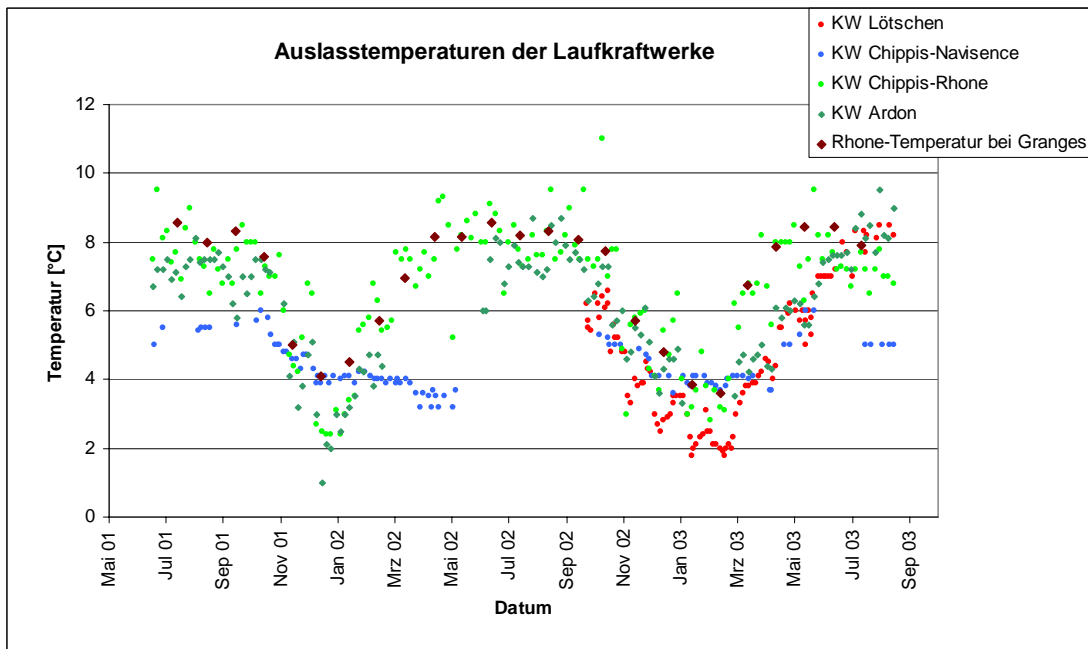


Abbildung 12: Auslasstemperaturen der Laufkraftwerke (Messung beim Kraftwerksauslass) und Rhonetemperatur bei Granges.

3.4 ZUSAMMENFASSUNG

Es liegen keine Aufzeichnungen der Wassertemperatur der Rhone vor der Kanalisierung und keine regelmässigen Messdaten vor dem Kraftwerksbau vor. Zwei historische Messreihen (jeweils eine Messung pro Tag) aus den Jahren 1886 von Forel und 1904/05 von Uetrecht sind vorhanden. Diese Messungen widerspiegeln den Zustand der Rhone ohne Wasserkraftnutzung, ohne die Auswirkungen der zweiten Rhonekorrektur und ohne die klimatische Erwärmung des zwanzigsten Jahrhunderts. Das Jahresmittel der Wassertemperatur liegt bei 6.9°C (1886) bzw. 7.0°C (1904/05). Im Winter 1886 wurden ein minimales Monatsmittel von 1.6°C und 1904/05 sogar um 0°C gemessen. Die grössten Monatsmittel der Wassertemperaturen in den Sommermonaten liegen bei 10.5°C (1886) mit einer gemessenen Maximaltemperatur von 12.7°C bzw. bei 11.1°C (1904) mit einer Maximaltemperatur von 13.5°C.

Die BWG misst die Wassertemperatur der Rhone in Porte du Scex seit 1971, in Sion seit 1974 und in Blatten seit 1987. Der Jahresmittelwert in Porte du Scex der Periode 1971 bis 2002 liegt bei 7.1°C. Die höchste Wassertemperatur wurde in dieser Periode im Juli 1996 mit 14.1°C und die tiefste im Januar 1971 mit 0.7°C gemessen. In den Temperaturmessungen sind bei den Tagesgängen deutlich Einflüsse durch die Wasserkraftnutzung sichtbar.

Für das EAWAG-Projekt SPI-2 wurden von Juni 2001 bis August 2003 37 Temperaturlogger an insgesamt 30 Stellen in der Rhone, in ihren wichtigsten Zuflüssen sowie in Kraftwerksauslässen zwischen Brig und Martigny gesetzt. Für zwei Jahre wurde die Wassertemperatur alle 15 bzw. 20 Minuten gemessen. Im Rahmen einer Diplomarbeit (Frey 2003) wurde in den Seitenbächen Borgne und Lonza mit 13 zusätzlichen Temperaturloggern die Wassertemperatur während eines Jahres gemessen.

Mit den Messungen kann der Einfluss der Wasserkraftwerke auf den Temperaturhaushalt der Rhone illustriert werden. Seitenbäche mit einer Restwasserstrecke, bei denen das Wasser direkt in die Rhone eingeleitet wird, haben deutlich höhere Wassertemperaturen als Seitenbäche, bei denen das turbinierte Wasser vor der Mündung in die Rhone rückgeleitet wird. Seitenbäche wie die Vispa, die Lonza und die Lizerne weisen kurzfristige Temperatursprünge durch Schwall/Sunk auf.

Im Sommer 2002 und 2003 wurden in den drei grössten Stauseen (Grande Dixence, Emosson, Mauvoisin) von der Staumauer aus Temperaturen gemessen. Es wurden die Wassertemperatur, die Leitfähigkeit und die Partikelkonzentration über die Wassertiefe aufgezeichnet und daraus der Wärmeinhalt pro Quadratmeter Wassersäule und die Dichte bestimmt (Frey et al. 2003a). Bei den trüben Stauseen Grande Dixence und Mauvoisin mit Schwebstoffkonzentrationen zwischen 58 und 86 mg l⁻¹ ist die Wassertemperatur praktisch über die gesamte Wassertiefe konstant zwischen 4 und 6°C. Nur beim relativ klaren Stausee Emosson mit Schwebstoffkonzentrationen zwischen 3 und 5 mg l⁻¹ gibt es eine Erwärmung der obersten 20 Meter auf bis zu 16°C. Die gemessenen Reservoirtemperaturen stimmen mit den Auslasstemperaturen der Speicherkraftwerke überein, welche von Frühling bis Herbst deutlich kühler als die Rhone sind.

4 REKONSTRUKTION DER NATÜRLICHEN WASSER- TEMPERATUR DER RHONE

In diesem Kapitel wird trotz der mangelnden Datengrundlage versucht, die natürliche Wassertemperatur der Rhone vor dem Kraftwerksbau zu rekonstruieren. Dazu wird die Repräsentativität der Wassertemperatur-Messungen von Forel (1892) und Uetrecht (1906) untersucht. Die historischen Werte werden mit den aktuellen Messungen des BWG verglichen. Mittels einfacher Abschätzungen, wie z.B. Vergleichen zwischen Tagen mit und ohne Kraftwerksbetrieb, wird die Wassertemperatur des turbinierten Wassers und der Rhone berechnet. Am Schluss werden Wassertemperaturen von anderen Flüssen, auch Referenzflüssen, mit denjenigen der Rhone verglichen.

4.1 REPRÄSENTATIVITÄT DER HISTORISCHEN MESSUNGEN

Da es sich bei den Temperaturmessungen von Forel und Uetrecht (Kapitel 3) nur um kurze Messperioden von jeweils 12 Monaten mit nur einer Temperaturmessung pro Tag handelt, stellt sich die Frage, wie repräsentativ diese Stichprobenmessungen sind.

4.1.1 Repräsentativität des Messzeitpunkts

Bei den früheren Temperaturwerten wurde die Wassertemperatur nur einmal am Tag gemessen. Um die Auswirkungen der Messzeit zu analysieren, wurde der Tagesgang aus dem Jahr 2002 in Porte du Scex genauer untersucht und die Temperaturmessungen an den Messzeiten um 12:00 (1886) und um 15:00 (1904/05) mit den mittleren Tagestemperaturen verglichen (Abbildung 13).

Die Temperaturmessungen um 12 Uhr (Mittelwert 7.74°C) und um 15 Uhr (Mittelwert 7.75°C) liegen dabei im Mittel etwa 0.10°C über dem Tagesmittel (7.64°C).

Wenn man nur den Sommer (April bis Oktober) berücksichtigt, sind die Differenzen zwischen den fixen Messungen und dem Tagesmittel 2002 noch etwas geringer (um 12 Uhr 0.09°C und um 15 Uhr 0.03°C). Durch den Einfluss der unterschiedlichen Messzeit kann also erwartet werden, dass die historischen Messungen im Mittel um nicht mehr als rund 0.10°C über dem effektiven Tagesmittel liegen.

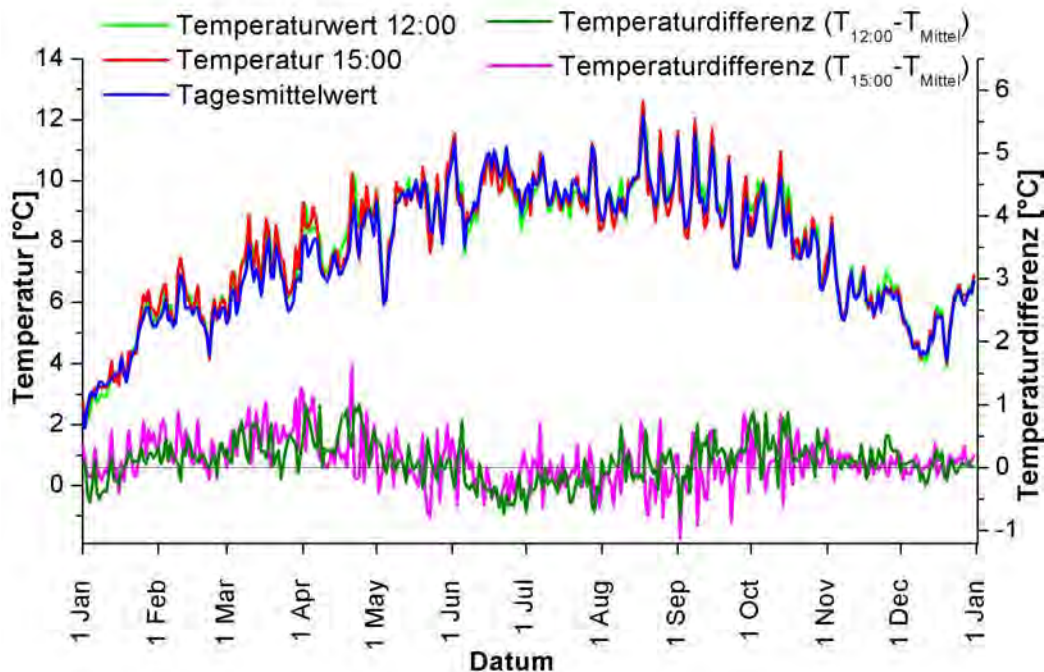


Abbildung 13: Jahresgang der Wassertemperatur in Porte du Scex um 12 Uhr, 15 Uhr und die mittlere Tagestemperatur, sowie die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Messungen und dem Tagesmittel im Jahr 2002.

4.1.2 Repräsentativität der Abflussmengen der Jahre 1886 und 1904/1905

Die Jahresmittel des Abflusses der Perioden von 1904/05 und 1982-2002⁴ sind zufälligerweise identisch (191.9 m³/s von 1982 bis 2002, 191.8 m³/s in 1904/05). Das bedeutet, dass sich das Jahr 1904/05 bezüglich der Jahresabflussmenge mit den aktuellen Werten vergleichen lässt. Im Jahr 1886 waren dagegen die Abflussmengen mit 140.9 m³/s deutlich kleiner als heute. Die kleinste Wassermenge in der Periode 1982 bis 2002 wurde 1996 mit 147.2 m³/s gemessen. Forel hat mehrere Abflussmessungen in den 70er und 80er Jahren des vorletzten Jahrhunderts analysiert (Forel 1892), welche wie die aktuellen Werte mit einer Pegel-Abfluss Beziehung bestimmt wurden. Das Jahr 1886 war bei diesen Messungen etwas unter dem Durchschnitt (Forel schätzt den mittleren Abfluss über diese Jahre auf 150 m³/s)⁵. Aufgrund des geringen Abflusses von 1886 kann dieses Jahr im Sommer nicht als repräsentativ bezeichnet werden. Der Abfluss in den letzten einundzwanzig Jahren (1982-2002)⁴ ist geringfügig höher (8 m³/s bzw. 4%) als derjenige der Periode 1916-1934. Dies deckt sich mit Beobachtungen in anderen Einzugsgebieten der Alpen, wie z.B. bei der Aare bei Brienzwiler, deren Abfluss seit 1905 um 8% zugenommen hat (GBL 2003). Rund die Hälfte dieser Zunahme im Grimselgebiet kann mit dem verstärkten Abschmelzen der Gletscher erklärt werden.

⁴ Im Folgendem wird die Periode 1982 bis 2002 verwendet, da dafür einheitliche Daten vorliegen.

⁵ Das Jahr 1879 mit einem Abfluss von 195 m³/s taxierte er als „année de grande eaux“.

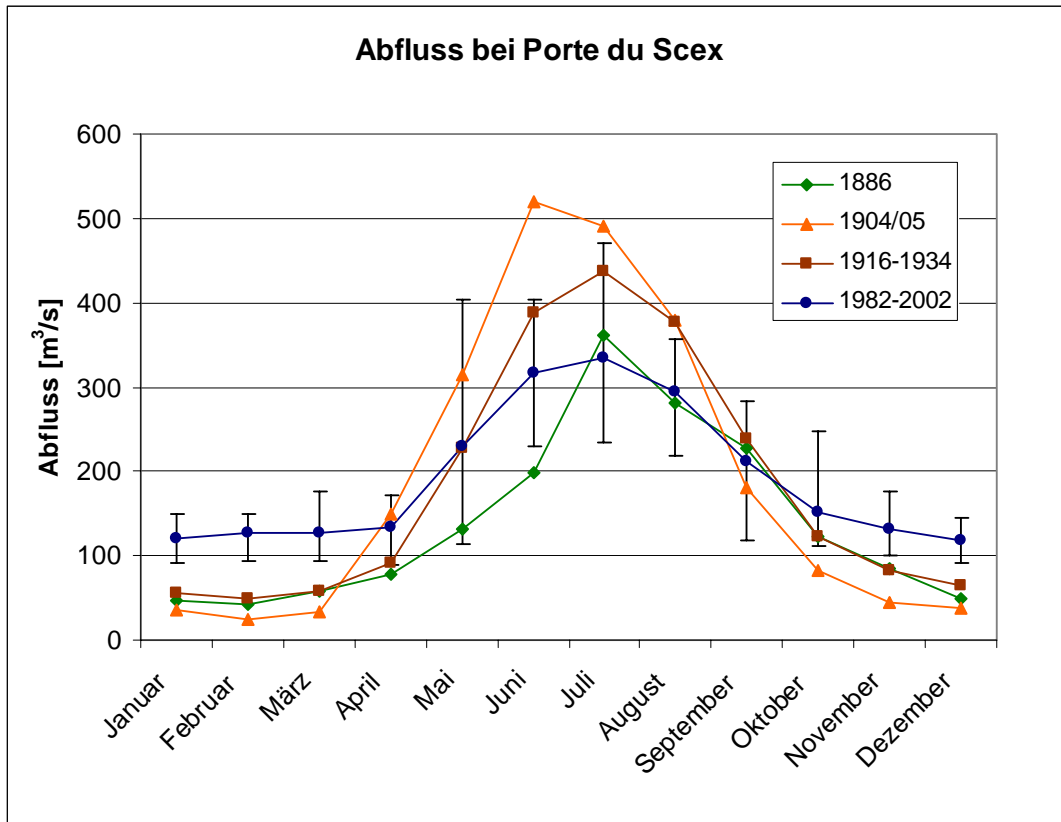


Abbildung 14: Mittlere Monatsabflüsse der Rhone bei Porte du Scex für die vier Zeitperioden 1886, 1904/05, 1916 bis 1934 und 1982 bis 2002 (inklusive der grössten und kleinsten Monatsmittelwerte der Jahre 1982 bis 2002).

Bei den Jahreszeiten sind die Unterschiede deutlicher (Abbildung 14): Der aktuelle Abfluss ist gegenüber der Situation vor dem Kraftwerksbau im Winter $57 \text{ m}^3/\text{s}$ höher und im Sommer $41 \text{ m}^3/\text{s}$ tiefer. In der Zeitperiode, in welcher die Abfluss-Monatsmittel früher kleiner waren, also von Oktober bis April (Abbildung 14), ist heute der Abfluss gesamthaft um 1008 Mio m^3 (entspricht einem mittleren Abfluss von $55 \text{ m}^3/\text{s}$) grösser. Dies entspricht einer Zunahme von 73% gegenüber der Situation ohne Wasserkraftwerke.

Im Winterhalbjahr wurden im Jahr 1886 mit $5 \text{ m}^3/\text{s}$ geringfügig kleinere und im Jahr 1904/05 mit $29 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich kleinere Abflussmengen gemessen als in der Zeitperiode 1916-1934 mit einem mittleren Abfluss von $72 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abfluss von 1886 ist für die Monate Oktober bis Mai deshalb repräsentativ (Tabelle 8).

Der Wasserabfluss in den letzten Jahren war mit $129 \text{ m}^3/\text{s}$ im Winterhalbjahr (Oktober bis März) ca. 2 mal bzw. 3 mal grösser als 1886 bzw. 1904/05. Wenn man die Monate einzeln betrachtet, sind die Unterschiede im Februar am grössten, der Abfluss war 1886 3 mal, 1904/05 sogar 5 Mal kleiner als in den letzten Jahren.

Im Sommerhalbjahr ist der Abfluss des Jahres 1904/05 um $45 \text{ m}^3/\text{s}$ grösser (entspricht 15%) und im Jahr 1886 um $80 \text{ m}^3/\text{s}$ kleiner als der Mittelwert von $295 \text{ m}^3/\text{s}$ der Periode 1916-1934. Das Jahr 1904/05 kann für Vergleiche der Wasser-

temperatur nur im August verwendet werden, wo der Abfluss mit der Zeitperiode 1916 bis 1934 übereinstimmt. In den restlichen Sommermonaten (Mai bis Juli) stimmt nur das Mittel der Jahre 1886 und 1904 mit dem Abfluss vor dem Kraftwerksbau überein (Tabelle 8). Im Sommerhalbjahr 1904 war die Abflussmenge um 1360 Mio. m³ höher als im Mittel der Jahre 1982-2002 (bzw. im Winterhalbjahr um 1370 Mio. m³ tiefer). Im trockenen Jahr 1886 war der Abfluss auch im Sommer sogar noch geringer als in den letzten Jahren mit Kraftwerksbetrieb.

Tabelle 8: Repräsentative Jahre (inkl. Abfluss) und Abfluss für die Zeitperiode 1916 bis 1934.

Monat	Repräsentatives Jahr bez. Abfluss	Abfluss [m3/s] des repräsent. Jahres	Abfluss [m3/s] 1916 bis 1934
Januar	1886	47	56.1
Februar	1886	42	48.4
März	1886	57	56.9
April	1886	79	90.5
Mai	Mittel 1904 und 1886	223	228
Juni	Mittel 1904 und 1886	360	388
Juli	Mittel 1904 und 1886	427	438
August	1904	378	378
September	1886	227	239
Oktober	1886	123	123
November	1886	84	83.3
Dezember	1886	48	65.2
Jahresmittel		176	184

Da die Abflussmengen der Referenz nicht mit derjenigen der Periode 1916 bis 1934 übereinstimmen, wird eine Korrektur eingeführt. Mit der Formel 1 wird aus den gewählten Temperaturwerten, dem Gradienten der Wassertemperatur bezüglich Abfluss und den Abflusswerten aus den ausgewählten Jahren (Tabelle 8) und der Periode 1916 bis 1934 die bez. Abfluss korrigierte Wassertemperatur $T_{Q\text{-korrigiert}}$ berechnet.

$$T_{Q\text{-korrigiert}} = T_{\text{historisch}} + \frac{\partial T}{\partial Q} (Q^{1916-1934} - Q^{\text{historisch}}) \quad \text{Formel 1}$$

Mit der Hilfe des Gradienten der Wassertemperatur und der Abflussmengen wurden die relativ kleinen Unterschiede zwischen dem Abfluss des repräsentativen Jahres und demjenigen der Zeitperiode 1916 bis 1934 bei der Wassertemperatur korrigiert. Die Resultate sind in der Tabelle 10 zusammengefasst.

Bei der Verteilung der Abflüsse über das Jahr sind also deutliche Unterschiede zwischen den historischen und den aktuellen Werten vorhanden. In den aktuellen Messungen ist eine deutliche Verschiebung der Abflussmengen von den Sommermonaten Juni, Juli und August in die Monate des Winters (Oktober bis April) zu erkennen. In einer Studie über die zeitliche Veränderung beim Abflussregime der Rhone zeigt Vivian, dass aus einem alpinen Abflussregime

durch die Wasserkraftnutzung ein mehr ozeanisches Regime wurde, wie es eigentlich erst im Unterlauf der Rhone natürlicherweise vorkommt (Vivian 1989). Ein Teil des Abflusses in den Frühlings- und Sommermonaten wird in den Stauseen gespeichert und erst im Winter wieder an die Rhone zurückgegeben. Das Volumen der Stauseen im Einzugsgebiet der Rhone beträgt rund 1400 Mio. m³ Wasser (siehe Anhang). Würde dieses Volumen vollständig und gleichmässig während dem Winterhalbjahr abgegeben, ergibt sich ein zusätzlicher Abfluss von rund 88 m³/s, welcher im Sommerhalbjahr fehlen würde. Da aber nicht das ganze Stauseevolumen geleert werden kann, ist der reale Wert kleiner und liegt bei rund 1000 Mio. m³ bzw. 55 m³/s (aus dem obigen Vergleich zwischen den historischen (1916-1934) und aktuellen Messwerten).

Gemäss Vivian (1989) wird durch den menschlichen Einfluss in den Jahren 1950 bis 1979 der Abfluss der am stärksten beeinflussten Monate Dezember bis Februar um 66% gegenüber seiner Referenzperiode von 1920 bis 1949 erhöht.

Tabelle 9: Bestimmung der historischen Bezugstemperatur aus den Abfluss- und Wassertemperaturmessungen der Jahre 1886 und 1904 und dem mittleren Abfluss der Jahre 1916 bis 1934.

Monat	Mittlerer Abfluss 1916-1934 [m ³ s ⁻¹]	Abfluss 1886 [m ³ s ⁻¹]	Wasser-temp. 1886 [°C]	Abfluss 1904/5 [m ³ s ⁻¹]	Wasser-temp 4.1904-3.1905 [°C]	Auswahl für historischen Bezug	Abflussauswahl Referenz [m ³ s ⁻¹]	Temp.-auswahl Referenz [°C]
Januar	56.1	47	1.6	35.5	-	1886	47	1.6
Februar	48.4	42	2.3	24.9	2.0	1886	42	2.3
März	56.9	57	5.0	32.9	6.4	1886	57	5.0
April	90.5	79	9.3	149.1	9.7	1886	79	9.3
Mai	228	132	10.5	314.3	10.8	1886/1904	223	10.7
Juni	388	199	10.5	520.2	10.2	1886/1904	360	10.4
Juli	438	362	9.7	491.5	11.1	1886/1904	427	9.9
August	378	282	9.7	378.1	9.6	1904	378	9.6
September	239	227	9.3	181	8.8	1886	227	9.3
Oktober	123	123	8.4	82.1	8.4	1886	123	8.4
November	83.3	84	4.8	44.6	7.3	1886	84	4.8
Dezember	65.2	48	2.1	37	-	1886	48	2.1
Jahresmittel	183.8	140.9	6.9	191.9	6.9		176	7.0

4.1.3 Repräsentativität der meteorologischen Bedingungen

Die Wassertemperatur eines Flusses ist neben dem Abfluss v.a. auch vom Klima der Umgebung abhängig. In einem Jahr mit einer höheren Umgebungstemperatur ist auch mit einer höheren Wassertemperatur zu rechnen. Durch die natürliche Klimavariabilität wäre es möglich, dass es sich bei den Jahren 1886 und 1904/05 um Jahre mit speziell tiefen oder hohen Temperaturen gehandelt hat. Wegen der Klimaänderung werden im Allgemeinen in den letzten Jahren etwas höhere Temperaturen erwartet. Um dies zu prüfen, wurden die Lufttemperaturwerte der untersuchten Perioden miteinander verglichen. Für den Vergleich eignen sich die Temperaturmessungen der MeteoSchweiz bei der Wetterstation in Sion. Für diese Sta-

tion liegen kontinuierliche Messungen seit 1864 vor. Der Standort der Wetterstation wurde im Jahr 1978 innerhalb von Sion verschoben. Dieser Standortwechsel sollte für den Vergleich aber keine Rolle spielen. In der Abbildung 15 sind die Monatstemperaturen der Station für die untersuchten Perioden aufgezeichnet. Die Jahrestemperaturen der historischen Messungen bewegen sich im gleichen Rahmen wie die Messungen der letzten Jahre. Die Mittelwerte der Periode 1916 bis 1934 (Jahresmittel 10°C) sind dabei in jedem Monat kleiner als in der Periode 1982 bis 2002 (Jahresmittel 8.8°C). Das Jahr 1904/05 war in Sion mit 10.2°C um 0.2°C wärmer als der Durchschnitt der letzten Jahre. Das Jahr 1886 liegt mit 10.1°C fast exakt im Durchschnitt der letzten Jahre. Im Winter waren die Temperaturen der vergangenen 20 Jahre mit einem Durchschnitt von 3.9°C etwas höher die untersuchten Jahre 1886 und 1904/05 mit 3.3°C. Die Sommermonate der Jahre 1886 und 1904/05 waren mit 16.8°C bzw. 16.9°C etwas wärmer als der Durchschnitt der letzten 20 Jahre mit 16.1°C.

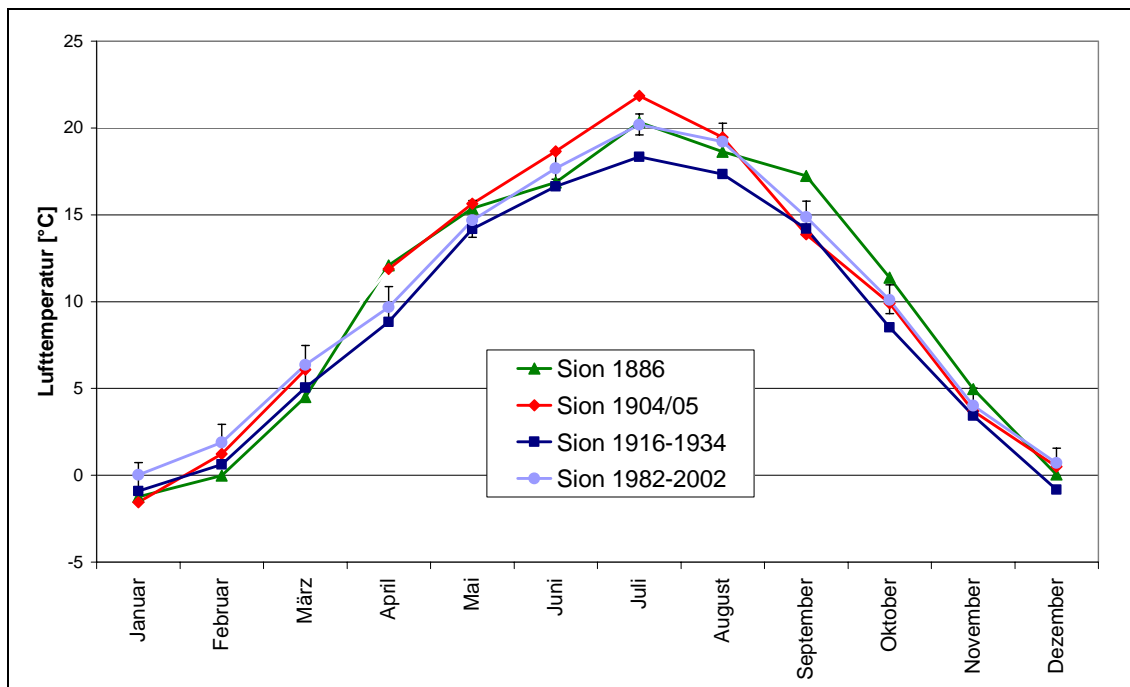


Abbildung 15: Monatsmittel der Lufttemperatur in Sion des Jahres 1886, von April 1904 bis März 1905 und der Periode 1916 bis 1934 sowie 1982 bis 2002.

Da auch die historischen Wassertemperaturen fast immer leicht höher waren als der Mittelwert der Periode 1916 bis 1934, ist es möglich, dass die klimatischen Bedingungen in diesen Jahren einen gewissen Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Aus diesem Grund werden die historischen Referenztemperaturen vor dem Bau der Kraftwerke aus den Jahren 1886 und 1904/05 bezüglich Repräsentativität der Abflussmengen und der Lufttemperaturen korrigiert.

Zusammen mit den gemessenen Abflusswerten aus den Jahren 1916 bis 1934 kann eine historische Referenz $T_{\text{historisch}}$ für die Wassertemperatur vor dem Bau der grossen Wasserkraftwerke in Bezug auf die Abflussmengen bestimmt werden. Dazu wurde jeweils der Monatsmittelwert der Wassertemperatur desjenigen

Jahres gewählt, bei welcher der Abfluss mit dem Mittelwert der Jahre 1916 bis 1934 am besten übereinstimmt (Tabelle 8).

Die historischen Wassertemperaturen wurden anschliessend auch noch bezüglich der Wetterverhältnisse korrigiert. Hierzu wird die Lufttemperatur verwendet, welche mit der Wassertemperatur sehr gut korreliert (Abbildung 16). Aus der Korrelation der Wassertemperatur mit der Lufttemperatur in den Jahren 1886 und 1904/05 und der Differenz der Lufttemperatur der Referenzjahre und der Zeitperiode 1916 bis 1934 kann mit der Formel 2 die korrigierte Wassertemperatur $T_{\text{korrigiert}}$ berechnet werden (Tabelle 10).

$$T_{\text{korrigiert}} = T_{\text{historisch}} + \frac{\partial T}{\partial T_{\text{Luft}}} (T_{\text{Luft}}^{1916-1934} - T_{\text{Luft}}^{\text{historisch}}) \quad \text{Formel 2}$$

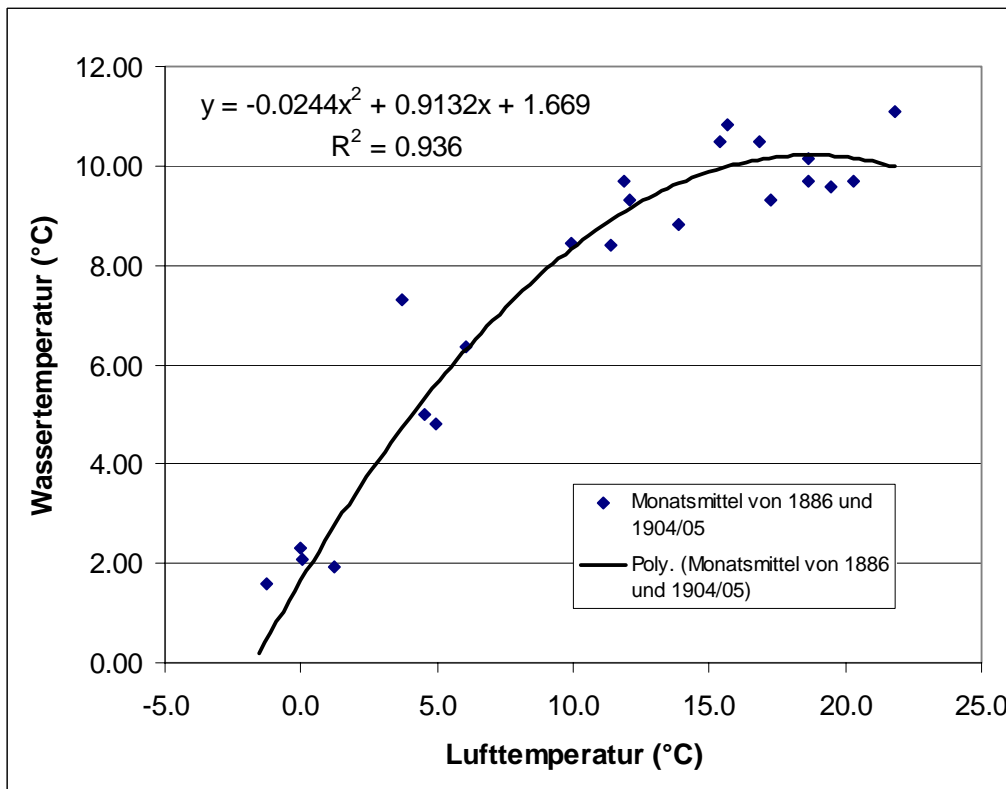


Abbildung 16: Korrelation der Wassertemperaturen der Rhone in Porte du Scex mit den Lufttemperaturen in Sion (Monatsmittel der Jahre 1886 und 1904/05).

Tabelle 10: Bestimmung der Referenztemperatur vor dem Bau der Wasserkraftwerke aus den historischen Temperaturmessungen. Die Wassertemperatur wird bezüglich der Differenzen bei den Abflussmengen und der Lufttemperatur zwischen den Jahren mit Temperaturmessung (1886 bzw. 1904) und der Periode mit der Abflussmessung (1916-1934) korrigiert.

Monat	Wassertemp. historische Referenz [°C]	Abfluss historisch 1886 bzw. 1904 [m ³ s ⁻¹]	Abfluss-monatsmittel 1916-34 [m ³ s ⁻¹]	dT/dT _{Luft} [°C/°C]	Wassertemp. korr. bez. Q-Differenz zu 1916-34 (Formel 1) [°C]	Wassertemp. korr. bez. Lufttemp. (Formel 2) [°C]
Januar	1.6	47	56	0.96	1.6	1.9
Februar	2.3	42	48	0.88	2.3	2.8
März	5.0	57	57	0.67	5.0	5.4
April	9.3	79	91	0.48	9.2	7.6
Mai	10.7	223	228	0.22	10.6	9.9
Juni	10.4	360	388	0.10	9.9	9.8
Juli	9.9	427	438	0.02	9.9	9.9
August	9.6	378	378	0.07	9.6	9.5
September	9.3	227	239	0.22	9.2	8.5
Oktober	8.4	123	123	0.50	8.4	7.0
November	4.8	84	83	0.75	4.8	3.6
Dezember	2.1	48	65	0.95	2.4	1.5
Jahresmittel	7.0	193	184		7.0	6.5

4.2 VERGLEICH DER Wassertemperatur verschieDener Zeitperioden

Der langjährige Mittelwert (1971-2002, Messungen BWG) der Temperatur der Rhone in Porte du Scex beträgt nach dem Bau der Wasserkraftwerke 7.1°C (Bereich von 6.7 bis 7.8°C) und die maximal bzw. minimal gemessenen Temperaturwerte 14.1°C (Juli 1996) und 0.7°C (Januar 1971). 1886 hat Forel eine mittlere Temperatur von 6.9°C bestimmt (Bereich von 12.7°C bis 0°C). Die Messungen von Utrecht für das Jahr 1904/05 ergeben eine mittlere Temperatur von 7.0°C. Berücksichtigt man die Korrektur aus Kapitel 4.1 so beträgt der Mittelwert der historischen Referenz 6.5°C. Der historische Jahresmittelwert war früher also 0.7°C tiefer als die aktuellen Messwerte des BWG. Die Erwärmung der Rhone in den letzten 20 Jahren beträgt gemäss Hari & Güttinger (2004) rund 0.8°C. Interessanter als die Jahresmittelwerte ist der Vergleich der Monatsmittelwerte, welcher in der Tabelle 11 zusammengefasst und in der Abbildung 17 dargestellt ist.

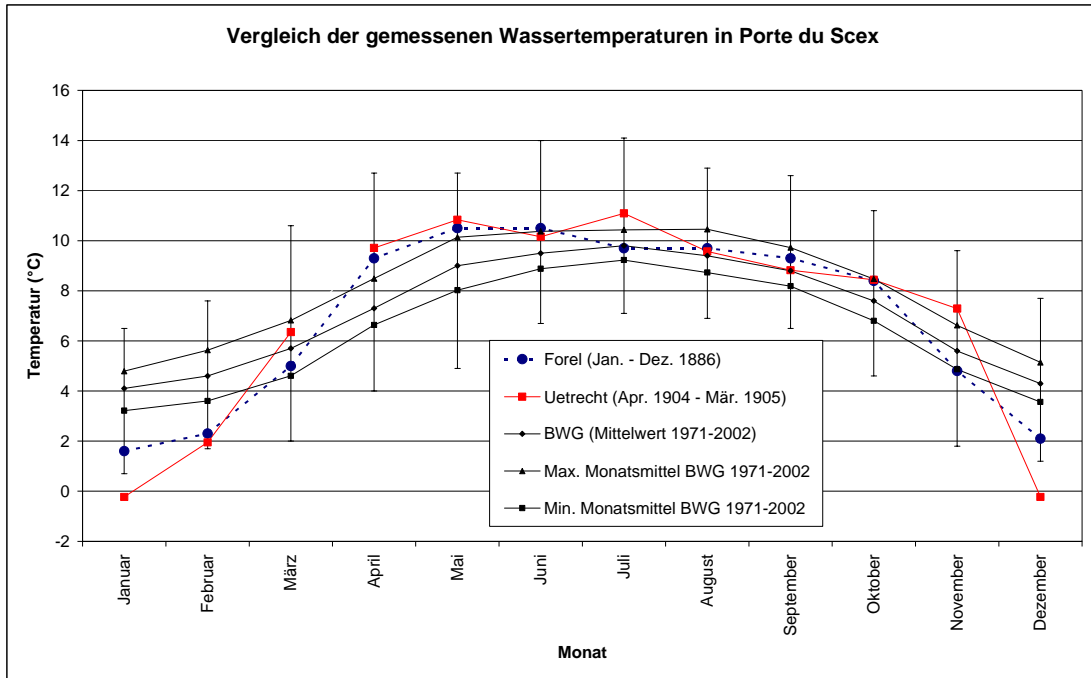


Abbildung 17: Vergleich der mittleren Temperaturen (Monatsmittel) in der Rhone von 1886, 1904/05 sowie den grössten und kleinsten Monatsmittelwerten aus den Jahren 1971 bis 2002 (inklusive den Maximalwerten (Fehlerbalken) der Jahre 1982-2002).

Tabelle 11: Monatsmittel der Wassertemperaturen der Rhone in Porte du Scex der Jahre 1886, April 1904 - März 1905 sowie 1982 bis 2002 und bez. Abfluss und Lufttemperatur korrigierte Wassertemperaturen der historischen Referenz (vor dem Bau der Wasserkraftwerke).

Monatsmittel der Wassertemperatur [°C]	BWG 1982-2002 (kontinuierl. Messung)	Forel Jan. 1886 – Dez. 1886 (12 Uhr)	Utrecht Apr. 1904 – März 1905 (15 Uhr)	Referenz-Temperatur (Q und T _{Luft} korrigiert)
Januar	4.14	1.60	-0.23	1.94
Februar	4.59	2.30	1.95	2.84
März	5.82	5.00	6.35	5.36
April	7.31	9.30	9.71	7.65
Mai	8.97	10.50	10.84	9.95
Juni	9.49	10.50	10.16	9.81
Juli	9.78	9.70	11.09	9.85
August	9.27	9.70	9.57	9.46
September	8.74	9.30	8.82	8.54
Oktober	7.71	8.40	8.44	6.97
November	5.73	4.80	7.29	3.65
Dezember	4.47	2.10	-0.23	1.52
Jahresmittel	7.18	6.90	7.00	6.48

Mit einigen zusätzlichen Messungen am Morgen und Abend bestimmte Forel eine „Tagesamplitude von bis zu 4°C; im Allgemeinen betrug sie 2°C“ (Forel 1892). Die maximale Tagesamplitude bei den gemessenen Wassertemperaturen in Porte du Scex im Jahr 2001 beträgt 2.4°C, der Mittelwert aller Tagesamplituden im Jahr 2001 liegt bei ca. 0.6°C. Uetrecht macht keine Angaben über die Amplitude der Wassertemperatur.

Sofern Messungen vorhanden sind, waren im Winterhalbjahr die Wassertemperaturen vor der hydroelektrischen Nutzung der Rhone in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) tiefer als heute. Auch die tiefsten Monatsmittelwerte der Temperaturen in der Periode von 1982 bis 2002 sind in diesen Monaten deutlich höher als die historischen Mittelwerte. Im Winter 1904/05 lagen gemessene Wassertemperaturen sogar unter 0°C. Dies ist theoretisch möglich, weil das Wasser im Fluss immer bewegt wird und dadurch ein Gefrieren verhindert werden kann⁶. Monatsmittelwerte unter 0°C, wie im Dezember 1904 und Januar 1905 von Uetrecht gemessen, sind aber relativ unwahrscheinlich, da so lange Kälteperioden selten sind. Hier sind Messfehler, z.B. Stehenlassen der Wasserprobe in der Kälte oder spätes Ablesen des Werts auf dem Thermometer in der kalten Luft wahrscheinlicher. Für die Bestimmung der Referenzwerte wurden die Messungen von Uetrecht im Winter nicht verwendet. In den Übergangsmonaten März und November sind keine klaren Tendenzen zu erkennen.

Von April bis Oktober werden heute im Mittel tiefere Temperaturen als vor der hydroelektrischen Nutzung gemessen. Die gemittelten Temperaturen über diese Monate betragen früher 9.6 (1886) bzw. 9.8°C (1904/05), in den Jahren 1982 bis 2002 wurde nur noch eine mittlere Temperatur von 8.8°C gemessen. Einzig im Jahr 1996 wurde mit einer durchschnittlichen Wassertemperatur von 9.6°C ein Wert in der gleichen Grössenordnung wie während den historischen Messungen festgestellt.

Die Abkühlung ist auch für die einzelnen Monate sichtbar. Die grössten Differenzen werden in den Monaten April und Mai festgestellt, auch die höchsten Wassertemperaturen in der Periode 1982 bis 2002 sind in diesen Monaten tiefer als die historischen Messwerte. Auch in den anderen Monaten sind die durchschnittlichen Temperaturen tiefer als die Messungen aus den Jahren 1886 und 1904/05. Einzig im Monat Juli 1886 waren die Temperaturen knapp (0.1°C) unter dem Mittelwert der letzten Jahre. Die Messungen belegen deutlich, dass die Wassertemperatur durch die Kraftwerksnutzung in den Wintermonaten gestiegen und in den Sommermonaten gesunken ist.

Die tiefere Wassertemperatur bei den historischen Messungen im Winter kann durch zwei Gründe erklärt werden. Erstens kühlte das Wasser bei tiefen Umgebungstemperaturen wegen des geringeren Abflusses in den früheren Jahren stärker ab, als mit den deutlich grösseren Abflussmengen in den letzten Jahren. Zweitens wird Wasser aus den Stauseen in die Rhone geleitet. Das Wasser aus den Tiefen der Stauseen (u.a. Grande Dixence, Mauvoisin und Emosson) weist im Winter eine Temperatur zwischen 3 bis 5°C auf, also in der Nähe der Temperatur maximaler Dichte (Abbildung 11). Zu Beginn des Winters ist noch relativ warmes Wasser von ca. 5°C aus den Sommermonaten vorhanden. Im April und Mai, wenn

⁶ Beim River Monitoring Programm des Staates Washington wurden im Fluss Kettle River in der Nähe von Barstow am 10. Januar 2000 extreme Wassertemperaturen von -1.4°C gemessen.

die Stauseen fast leer sind, kann die Wassertemperatur bis minimal 3°C absinken, da dann auch Wasser aus den kälteren Oberflächenbereich turbinert wird.

Bei der Einleitung in die Rhone hat das Wasser immer noch in etwa die Temperatur wie im Stausee, da es in den Stollen und durch die Reibungsverluste nur geringfügig erwärmt wird (siehe auch Kapitel 3.3.4). Die Rhone hat in Porte du Scex in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) eine mittlere Temperatur von 4.4°C. Diese Temperatur liegt deutlich höher als die gemessene Wassertemperatur vor dem Kraftwerksbau im Jahr 1886 von 2.0°C (Tabelle 11) und entspricht etwa der mittleren Auslasstemperatur der Kraftwerke im Winter (Abbildung 11) bei ca. 4.5°C. Da nur rund die Hälfte des Abflusses im Winter aus den Stauseen stammt, muss es neben dem turbinerten Wasser noch weitere Einflüsse geben, welche zu einer Erwärmung im Winter führen. Neben der Klimaänderung können dies auch Einleitungen von Abwasser oder Kühlwasser in die Rhone sein.

Auch für die heute tieferen Wassertemperaturen während des Sommers ist die hydroelektrische Nutzung des Wassers zu einem grossen Teil verantwortlich. Bei den Speicherkraftwerken wird das Wasser in den Zuflüssen der Rhone in einer hohen Lage entzogen und erst kurz vor der Mündung oder direkt in die Rhone zurückgeleitet. Bei der hydroelektrischen Nutzung wird dabei dem Wasser potentielle Energie entzogen und in elektrischen Strom umgewandelt (Bonjour 1998, Meier 2003). Im natürlichen Flusslauf würde die potentielle Energie in Reibungsenergie umgewandelt und das Wasser würde dadurch erwärmt. Zudem hat das Wasser aus den Stauseen im Sommer einen abkühlenden Effekt, da die Temperaturen in der Tiefe der Wasserentnahme nicht über 4 bis 6°C steigen (Abbildung 11).

4.3 VERGLEICH MIT UND OHNE KRAFTWERKS BETRIEB

Aufgrund der mangelhaften Datengrundlage vor der Rhonekorrektur und dem Bau der Wasserkraftwerke wurden Bilanzierungen und statistische Auswertungen durchgeführt, um die Einflüsse der Kanalisierung und der Wasserkraftnutzung grob abzuschätzen.

Um den Einfluss der Kraftwerke aufzuzeigen, werden bei den Untersuchungen die Arbeitstage⁷ von den Wochenenden unterschieden. Wegen der geringeren Stromnachfrage sind an den Wochenenden die Speicherkraftwerke mit den grossen Stauseen nur wenig oder gar nicht in Betrieb. Durch die geringe Auslastung der Kraftwerke an den Wochenenden werden in Porte du Scex unterschiedliche Abflussmengen an Arbeitstagen und den Wochenenden erwartet.

Untersucht wird die Periode von 1982 (Start Klimastation in Aigle) bis 2002. Da die Abfluss- und Temperaturverhältnisse von den meteorologischen Bedingungen abhängig sind und über das Jahr variieren (Schneeschnmelze, Niederschlagsverteilung) werden die Analysen für die Monate einzeln durchgeführt.

Als erstes werden die Monatsmittelwerte der Arbeitstage mit den an den Wochenenden gemessenen Werten verglichen. Die Daten sind in der Tabelle 12 aufgelistet und in der Abbildung 20 dargestellt.

⁷ Feiertage unter der Woche werden der Einfachheit halber als normale Arbeitstage gewertet

Tabelle 12: Monatsmittelwerte der Wassertemperatur und des Abflusses in Porte du Scex während der Zeitperiode 1982 bis 2002, aufgeteilt in Arbeitstage und Wochenende.

Periode:	Arbeitstage (AT)		Wochenende (WE)		Differenz (WE-AT)	
	Durchschnittstemp. [°C]	Mittlerer Abfluss [m³/s]	Durchschnittstemp. [°C]	Mittlerer Abfluss [m³/s]	Temp.-differenz [°C]	Abflussdifferenz [m³/s]
Januar	4.12	133.9	4.17	89.5	0.05	-44.4
Februar	4.55	141.4	4.68	94.4	0.13	-47.0
März	5.72	140.1	6.06	95.0	0.35	-45.1
April	7.17	142.2	7.66	109.6	0.48	-32.6
Mai	8.91	237.7	9.12	208.5	0.21	-29.2
Juni	9.42	327.3	9.65	290.0	0.23	-37.3
Juli	9.69	343.4	10.01	315.5	0.32	-27.9
August	9.17	304.8	9.53	265.6	0.36	-39.2
September	8.58	224.4	9.13	179.1	0.55	-45.4
Oktober	7.59	163.6	8.01	123.1	0.42	-40.5
November	5.71	143.5	5.80	101.5	0.09	-42.0
Dezember	4.45	128.1	4.52	91.2	0.07	-36.9
Mittelwert	7.10	202.9	7.37	164.0	0.27	-38.9

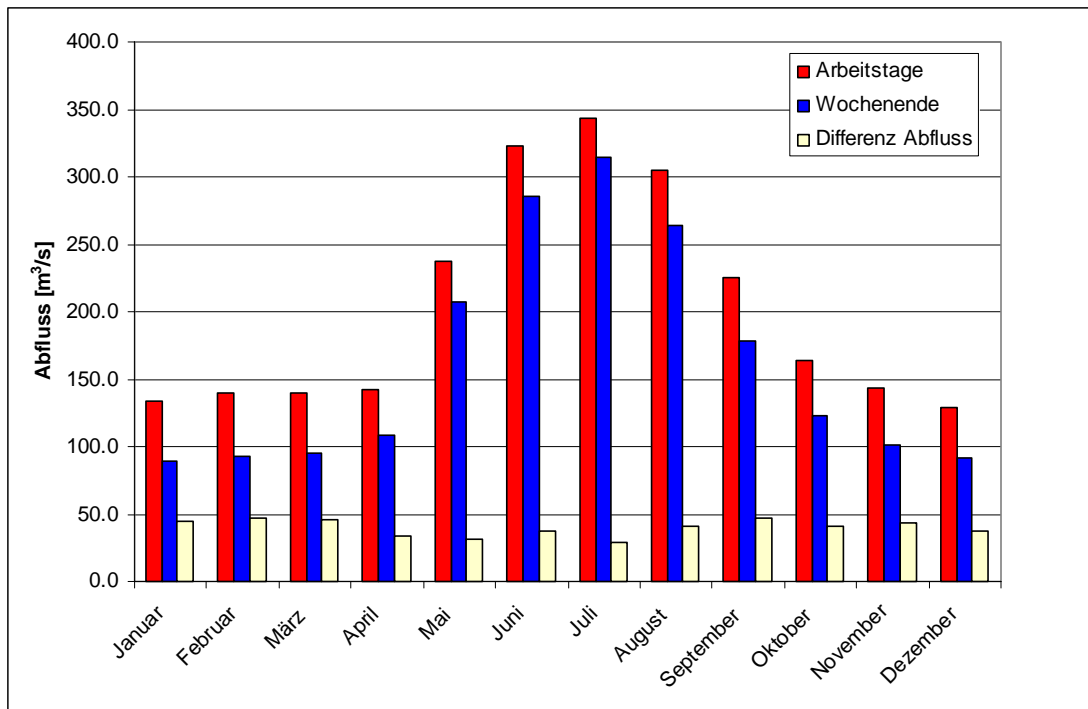


Abbildung 18: Monatsmittelwerte des Abflusses an Arbeitstagen und an Wochenenden sowie Differenzen (Arbeitstag minus Wochenende) in Porte du Scex (1982 bis 2002).

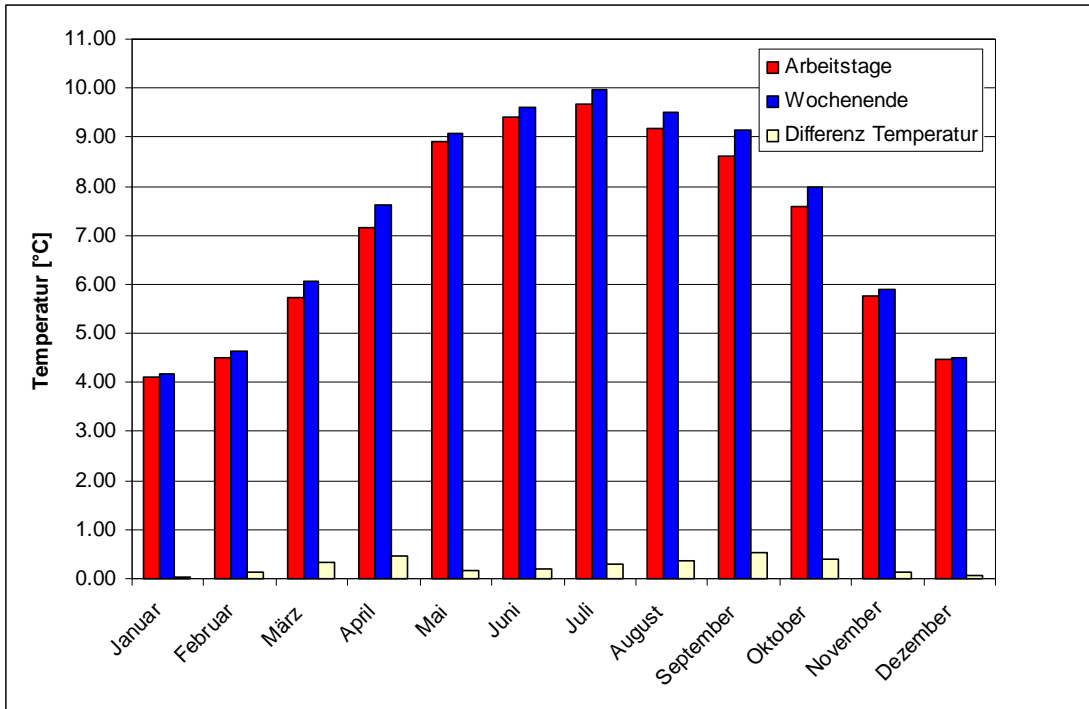


Abbildung 19: Monatsmittelwerte der Temperatur an Arbeitstagen und an Wochenenden sowie Differenzen (Wochenende minus Arbeitstag) in Porte du Scex (1982 bis 2002).

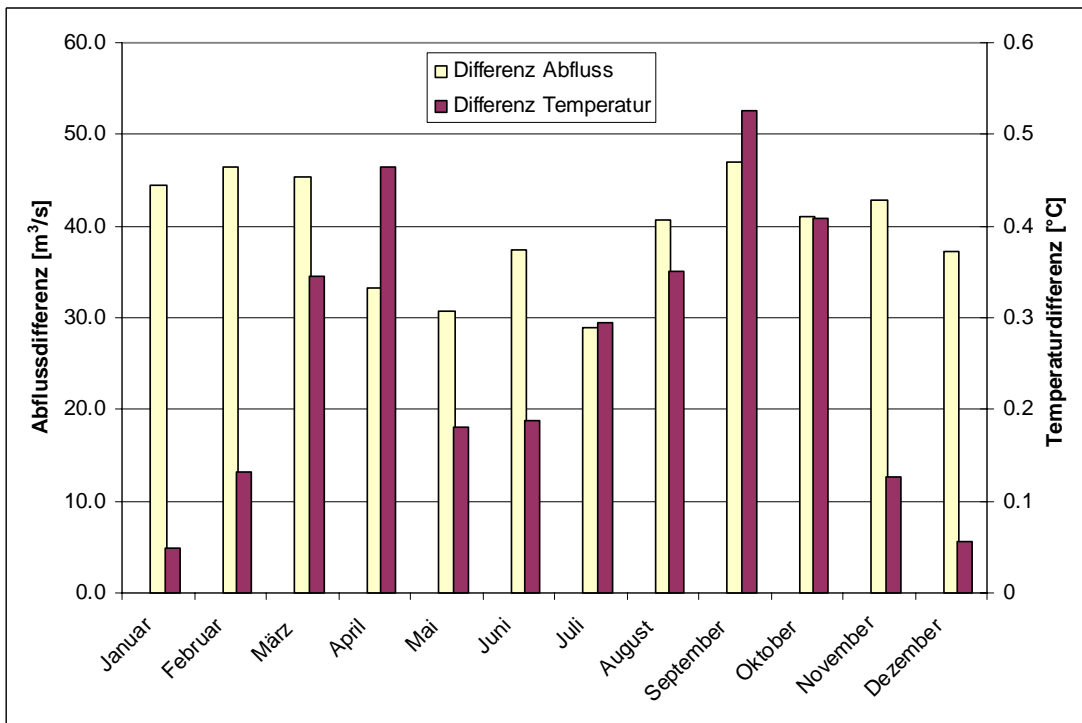


Abbildung 20: Differenzen des Abflusses (AT-WE) und der Temperatur (WE-AT) in Porte du Scex (1982 bis 2002).

Die geringe Auslastung der Kraftwerke an den Wochenenden wird durch die Daten bestätigt. Die Abflussmengen sind unter der Woche im Mittel rund $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 %) höher als an den Wochenenden. Wenn man die einzelnen Monate betrachtet, sind die absoluten Unterschiede in allen Monaten ähnlich (von $28 \text{ m}^3/\text{s}$ im Juli bis $47 \text{ m}^3/\text{s}$ im Februar), wegen des geringeren Abflusses sind die prozentualen Differenzen im Winterhalbjahr (mit einem mittleren zusätzlichen Abfluss von $43 \text{ m}^3/\text{s}$) jedoch deutlich grösser als im Sommer (mit $36 \text{ m}^3/\text{s}$). Zum Vergleich: Im Sommerhalbjahr werden gemäss den Angaben der fünf grössten Kraftwerke (Chandoline, Nendaz, Chippis, Mauvoisin, St. Leonard) $24.4 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Winterhalbjahr $37.6 \text{ m}^3/\text{s}$ turbinert. Da die kleineren Kraftwerke keine grossen Speicherseen haben und dort im Sommerhalbjahr viel mehr Wasser turbinert wird, ist der grössere Unterschied im Sommer beim obigen Vergleich realistisch.

Aus dem Vergleich der Messungen vor und nach dem Kraftwerksbau ist bekannt, dass der Abfluss heute im Winterhalbjahr rund $55 \text{ m}^3/\text{s}$ grösser ist. Zusammen mit dem Vergleich der Abflüsse unter der Woche und an den Wochenenden kann gefolgert werden, dass rund $66 \text{ m}^3/\text{s}$ während der Woche und ca. $26 \text{ m}^3/\text{s}$ an den Wochenenden turbinert wird. Der Unterschied im Abfluss zwischen Wochenenden und Arbeitstagen beträgt dann, wie oben erwähnt, $40 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Mittelwert eines Abflusses an zwei Tagen (Wochenende) mit $26 \text{ m}^3/\text{s}$ und fünf Tagen (Arbeitstage) mit $66 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt $55 \text{ m}^3/\text{s}$.

Differenzen resultieren auch bei der Wassertemperaturen: Diese sind am Wochenende rund 0.3°C höher als unter der Woche. Unerwarteterweise sind die Wassertemperaturen in jedem Monat an den Wochenenden höher. Die grössten Temperaturunterschiede gibt es im September (0.55°C), im April (0.48°C) und im Oktober (0.42°C), am kleinsten sind die Differenzen im Dezember (0.07°C) und im Januar (0.05°C).

Wie bei den Abflussmengen und den Wassertemperaturen können auch die Lufttemperaturen an Wochentagen und Wochenenden verglichen werden. Die meteorologischen Bedingungen bei der Messstation Sion der MeteoSchweiz sollten grundsätzlich an Arbeitstagen und Wochenenden nicht unterschiedlich sein. Unterschiede zwischen Wochentagen und Wochenenden, welche bei einer kleinen Stichprobenmenge auftreten, sollten wegen der langen Messdauer von 21 Jahren ausgeglichen sein. Die Resultate des Vergleichs sind in der **Error! Not a valid bookmark self-reference.** zusammengefasst.

Im Sommer sind die Arbeitstage meistens wärmer, während es im Winter eher die Wochenenden sind (mit Ausnahme des Monats März). Die grossen Unterschiede im März, Mai und Juni sind mit 0.2°C und mehr sind auffallend. Aus diesem Grund wurde in einem t-Test überprüft, ob die Datenmengen aus der gleichen Grundmenge stammen. Bei einem Signifikanzniveau von 0.1 kann die Hypothese, dass die beiden Mengen identisch sind, nicht verworfen werden (Tabelle 14). Anders sieht es bei der Wassertemperatur aus (

Tabelle 15). Hier kann beim gleichen Signifikanzniveau nur in den Monaten November bis Januar die Hypothese bestätigt werden. Bei den übrigen Monaten muss die Hypothese verworfen werden. Mit Ausnahme von Februar und Mai muss die Hypothese der Identität sogar bei einem Signifikanzniveau von 0.05 verworfen werden. Bei der Wassertemperatur gibt es also mit Ausnahme des Winters einen deutlich signifikanten Unterschied zwischen Arbeitstagen und Wochenenden.

Tabelle 13: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur in Sion während der Zeitperiode 1982 bis 2002, aufgeteilt in Arbeitstage und Wochenende.

Lufttemp. [°C]	Durchschnittstemperatur Arbeitstage	Durchschnittstemperatur Wochenende	Differenz Wochenende minus Arbeitstage
Januar	1.14	1.30	0.16
Februar	2.34	2.41	0.06
März	5.98	5.67	-0.31
April	8.90	8.77	-0.13
Mai	13.79	13.59	-0.19
Juni	16.76	16.38	-0.38
Juli	19.15	19.07	-0.08
August	18.33	18.37	0.04
September	14.23	14.20	-0.03
Oktober	10.20	10.34	0.14
November	5.06	5.07	0.00
Dezember	2.29	2.44	0.15
Mittelwert	9.89	9.84	-0.05

Qualitativ kann gesagt werden, dass die tieferen Wassertemperaturen an den Arbeitstagen eine Folge der zusätzlichen Wasserkraftnutzung aus den Speicherkraftwerken sind. Von den Kraftwerken wird kaltes Wasser aus den Stauseen in die Rhone geleitet, was zu einer Abkühlung der Rhone führt. Im Winter sind diese Auswirkungen gering, weil die Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser aus den Stauseen und dem Wasser in der Rhone nur klein ist. Zudem wird aufgrund des hohen Strombedarfs auch häufiger am Wochenende turbinert als im Sommer.

Tabelle 14: Ergebnisse für den t-Test bei der Lufttemperatur in Sion während der Zeitperiode 1982 bis 2002 für die Hypothese, dass Arbeitstage und Wochenende aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Bei einem Signifikanzniveau von 0.1 muss die Hypothese bei einem Wert von t grösser als 1.65 verworfen werden.

Monat	Lufttemp. Arbeitstage	Standard abw.	Anzahl Daten (n)	Lufttemp. Wochenenden	Standard abw.	Anzahl Daten (n)	t
Jan	1.14	4.91	614	1.30	4.91	246	0.43
Feb	2.34	3.73	424	2.41	3.46	169	0.19
Mrz	5.98	3.29	465	5.67	3.01	186	1.10
Apr	8.90	3.08	450	8.77	3.35	180	0.46
Mai	13.79	3.23	466	13.59	3.14	185	0.69
Jun	16.76	3.10	449	16.38	3.25	181	1.38
Jul	19.15	2.61	465	19.07	2.87	186	0.34
Aug	18.33	2.57	466	18.37	2.55	185	0.19

Der Temperaturhaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche

Sep	14.23	2.70	449	14.20	2.64	181	0.11
Okt	10.20	2.87	465	10.34	2.86	186	0.55
Nov	5.06	3.41	451	5.07	3.61	179	0.01
Dez	2.29	3.50	464	2.44	3.47	187	0.49

Tabelle 15: Ergebnisse für den t-Test bei der Wassertemperatur in Porte du Scex während der Zeitperiode 1982 bis 2002 für die Hypothese, dass die Temperatur der Arbeitstage und Wochenenden aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Bei einem Signifikanzniveau von 0.1 muss die Hypothese bei einem Wert von t grösser als 1.65 verworfen werden, bei einem Signifikanzniveau von 0.05 muss die Hypothese bei einem Wert von t grösser als 2.85 verworfen werden.

Monat	Wassert. Arbeitstage	Standard abw.	Anzahl Daten (n)	Wassert. Wochenenden	Standard abw.	Anzahl Daten (n)	t
Jan	4.12	1.621	614	4.17	1.792	246	0.38
Feb	4.55	0.764	424	4.68	0.856	169	1.85
Mrz	5.72	0.986	465	6.06	1.119	186	3.89
Apr	7.17	1.129	450	7.66	1.24	180	4.71
Mai	8.91	0.993	466	9.12	1.007	185	2.45
Jun	9.42	0.843	449	9.65	0.975	181	2.92
Jul	9.69	0.649	465	10.01	0.735	186	5.43
Aug	9.17	0.705	466	9.53	0.744	185	5.81
Sep	8.58	0.742	449	9.13	0.979	181	7.59
Okt	7.59	0.903	465	8.01	0.963	186	5.32
Nov	5.71	1.006	451	5.80	1.105	179	0.93
Dez	4.45	0.844	464	4.52	0.957	187	0.96

Die grössten Auswirkungen liegen jedoch nicht in den Sommermonaten, wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Rhone und den Stauseen am grössten ist, sondern in den Monaten September und Oktober. Das ist auf das Verhältnis des turbinieren Wassers zur Wassermenge in der Rhone zurückzuführen. Im Sommer hat die Rhone aufgrund der Schneeschmelze die grössten Abflussmengen und somit wird auch die prozentuale Differenz zwischen den Wassermengen am Wochenende und unter der Woche kleiner. Bei diesen Abflussbedingungen wirkt sich das zusätzliche kühle Stauseewasser unter der Woche weniger stark aus, als in den Monaten mit einem geringern Abfluss.

Die Unterschiede zwischen Arbeitstagen und Wochenenden zeigen, dass die Wasserkraftnutzung einen Einfluss auf Abflussmengen und Wassertemperatur der Rhone hat. Die Wochenenden stehen aber nicht für die natürliche Situation, da an diesen Tagen das Wasser in den Stauseen gespeichert wird und erst an den Wochentagen turbiniert wird. Die Differenzen geben nur die Grössenordnung der Beeinflussung an. Wegen der schwierigen zeitlichen Abgrenzung (zeitweise Turbinierung am Wochenende bzw. Stillstehen der Turbinen unter der Woche und unterschiedlicher Fliesszeit bis zur Messstelle), der Nichtberücksichtigung der Feiertage und der aufgrund der limitierten Stichprobengrösse unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen können die Resultate des Vergleichs nicht eins zu eins übernommen werden. Wenn aber die Temperaturdifferenz und die Differenz bei den Abflussmengen kombiniert werden, kann daraus die Wassertemperatur des turbinieren Wassers bestimmt werden. Mittels einer Mischungsrechnung (Formel 3) aus Basisabfluss am Wochenende und dem erhöhten Abfluss durch Turbinierung unter der Woche sowie dem bekannten zusätzlichen Abfluss der Arbeitstage kann die Temperatur des turbinieren Wassers $T_{\text{Reservoir}}$ bestimmt werden (Abbildung 21).

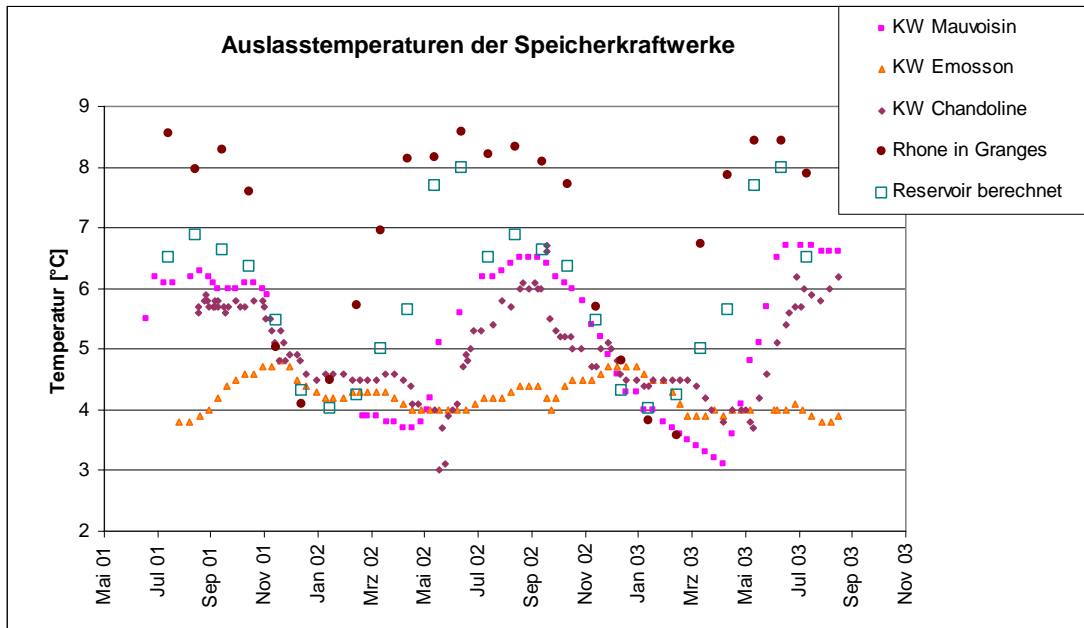


Abbildung 21: Die berechnete Reservoirtemperatur und die Auslasstemperatur der Kraftwerke Mauvoisin, Chandoline (Grande Dixence) und Emosson sowie die Wassertemperatur der Rhone in Granges.

$$T_{\text{Reservoir}} = \frac{T_{\text{Arbeitstag}} Q_{\text{Arbeitstag}} - T_{\text{Wochenende}} Q_{\text{Wochenende}}}{Q_{\text{Arbeitstag}} - Q_{\text{Wochenende}}} \quad \text{Formel 3}$$

Die mittlere Auslasstemperatur der Reservoirs hat einen sinusförmigen Jahresverlauf (Abbildung 21). Von Juli bis Februar liegt die berechnete Reservoirtemperatur in der Nähe der gemessenen Auslasstemperaturen der grossen Speicherkraftwerke Mauvoisin und Chandoline. Die „Ausreisser“ in den Monaten März, April und v.a. Mai sowie Juni sind vermutlich auf Effekte der Schneeschmelze zurückzuführen. Bei der Schneeschmelze fliesst viel kaltes Wasser, so dass auch am Wochenende die Wasserkraftwerke in Betrieb sind. Der Nenner in Formel 3 wird dadurch verhältnismässig klein. Zusätzlich gibt es Überlaufsituationen, bei denen nicht alles Wasser gefasst werden kann und ein Teil in die Restwasserstrecken geleitet wird. Wenn es v.a. am Wochenende Überlauf mit kaltem Wasser gibt, wird dadurch der zweite Term in der Formel 3 verkleinert und dadurch der Zähler vergrössert. Das führt zu einer zu grossen berechneten Reservoirtemperatur. Wenn die Überlaufmenge bekannt wäre, könnte die Formel 3 mit einem zusätzlichen Term für den Überlauf ergänzt werden.

4.4 KORRELATION DER WASSERTEMPERATUR MIT ANDEREN PARAMETERN

4.4.1 Regression: Wassertemperatur versus Abfluss

Die Regression zwischen der Wassertemperatur und dem Abfluss wird auf drei verschiedene Arten analysiert:

1. Die Wassertemperatur wird direkt gegen die Abflussmenge aufgetragen.
2. Neben dem Abfluss wird die Wassertemperatur von den äusseren Bedingungen beeinflusst. Wenn auch die klimatischen Bedingungen in den einzelnen Monaten ähnlich sind, wird die Analyse klimatischen Schwankungen überlagert. Auf einer langen Fließstrecke mit konstanten äusseren Verhältnissen nähert sich die Wassertemperatur einer Gleichgewichtstemperatur. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wird die Lufttemperatur bei der Regression mitberücksichtigt und die Temperatur als Differenz Lufttemperatur minus Wassertemperatur parametrisiert. Diese Temperatur wird gegen die Abflussmenge aufgetragen.
3. Zusätzlich wird der Zusammenhang zwischen den Anomalien der Abflussmengen und der Temperatur untersucht. Dazu wird die Abweichung der Wassertemperatur vom 14-tägigen Mittel gegen die Abweichung des Abflusses vom 14-tägigen Mittel aufgetragen.

Die Resultate der Regressionsanalyse (Steigung, Achsenabschnitt, Bestimmtheitsmass R^2) sind in der Tabelle 16 (Arbeitstage) und Tabelle 17 (Wochenende) zusammengetragen.

Tabelle 16: Resultate der Regressionsanalysen zwischen der Wassertemperatur und dem Abfluss (Temperatur vs. Abfluss, Temperaturdifferenz vs. Abfluss und Temperatur- vs. Abflussanomalien) für die Arbeitstage bei der BWG-Messstation in Porte du Scex.

Arbeitstage									
	Temperatur vs. Abfluss			Temperaturdifferenz vs. Abfluss			Temperatur- vs. Abflussanomalien		
	Steigung [°C s/m ³]	Achsenabschnitt [°C]	R ²	Steigung [°C s/m ³]	Achsenabschnitt [°C]	R ²	Steigung [°C s/m ³]	Achsenabschnitt [°C]	R ²
Januar	-0.003	4.5	0.01	-0.029	0.9	0.06	-0.0003	-0.02	0.00
Februar	-0.008	5.7	0.09	-0.021	0.7	0.04	-0.0063	0.02	0.10
März	-0.009	7.0	0.07	0.014	-1.7	0.02	-0.0114	0.02	0.12
April	-0.006	8.0	0.03	0.016	-0.5	0.05	-0.0124	-0.07	0.13
Mai	0.000	9.0	0.00	0.017	0.9	0.35	-0.0035	-0.03	0.04
Juni	-0.001	9.7	0.01	0.013	3.1	0.20	-0.0025	-0.04	0.04
Juli	-0.002	10.2	0.04	0.013	5.0	0.21	-0.0023	-0.05	0.03
August	-0.003	10.2	0.10	0.011	5.8	0.09	-0.0023	-0.07	0.04
September	-0.004	9.5	0.10	0.024	0.3	0.30	-0.0051	-0.07	0.10
Oktober	0.001	7.5	0.00	0.008	1.3	0.03	-0.0005	-0.09	0.00
November	-0.003	6.2	0.01	-0.004	0.1	0.00	-0.0010	0.02	0.00
Dezember	0.004	3.9	0.03	0.004	-2.6	0.00	0.0006	-0.02	0.00

Tabelle 17: Resultate der Regressionsanalysen zwischen der Wassertemperatur und dem Abfluss (Temperatur vs. Abfluss, Temperaturdifferenz vs. Abfluss und Temperatur- vs. Abflussanomalien) für die Wochenendtage bei der BWG-Messstation in Porte du Scex.

Wochenende									
	Temperatur vs. Abfluss			Temperaturdifferenz vs. Abfluss			Temperatur- vs. Abflussanomalien		
	Steigung [°C s/m ³]	Achsen- ab- schnitt [°C]	R ²	Steigung [°C s/m ³]	Achsen- ab- schnitt [°C]	R ²	Steigung [°C s/m ³]	Achsen- ab- schnitt [°C]	R ²
Januar	-0.0051	4.6	0.02	-0.046	1.3	0.11	-0.0012	-0.02	0.00
Februar	-0.0103	5.6	0.08	-0.021	-0.3	0.03	-0.0058	-0.10	0.06
März	-0.0081	6.8	0.04	0.017	-2.0	0.04	-0.0115	-0.17	0.11
April	0.0016	7.4	0.00	0.028	-2.0	0.14	-0.0107	0.03	0.08
Mai	-0.0002	9.1	0.00	0.019	0.6	0.41	-0.0044	0.05	0.04
Juni	-0.0013	10.0	0.01	0.012	3.1	0.15	-0.0027	0.08	0.02
Juli	-0.0024	10.7	0.08	0.012	5.4	0.16	-0.0041	0.17	0.12
August	-0.0035	10.4	0.08	0.017	4.2	0.22	-0.0032	0.18	0.08
September	-0.0039	9.9	0.11	0.010	3.3	0.11	-0.0033	0.31	0.08
Oktober	0.0002	8.0	0.00	0.007	1.4	0.07	-0.0004	0.33	0.00
November	0.0025	5.7	0.00	0.012	-1.8	0.02	0.0045	0.26	0.03
Dezember	0.0034	4.2	0.01	-0.001	-2.0	0.00	0.0014	0.08	0.00

Die Streuung der Messwerte ist zu gross um eine Beziehung mit einem starken Bestimmtheitsmass zu erhalten. Das R² ist in alle Untersuchungen sehr klein, eine eindeutige Funktion der Wassertemperatur in Abhängigkeit des Abflusses kann so nicht aufgestellt werden. Aus der Analyse können trotzdem gewisse Erkenntnisse gezogen werden.

4.4.2 Abfluss versus Temperatur

In fast allen Monaten von Frühling bis Herbst ist die Abnahme der Wassertemperatur mit zunehmendem Abfluss zu erkennen. Dies könnte ein Effekt der Schneeschmelze sein, bei der viel kaltes Wasser entsteht. Die Ausnahmen sind auf die Verteilung der Messwerte zurückzuführen. So werden bei der Regressionsanalyse für den Oktober einzelne Messungen mit einem hohen Abfluss und einer hohen Temperatur viel zu stark gewichtet, so dass die Regressionsgerade eine positive Steigung bekommt und die Wassertemperatur mit zunehmendem Abfluss zunimmt.

Im Winter ist die Analyse weniger eindeutig, ob wirklich die erwartete Zunahme der Wassertemperatur mit zunehmendem Abfluss vorliegt.

Wie bei der Auswertung der Mittelwerte gesehen, sind die Temperaturen an den Wochenenden etwas höher und der Abfluss ist etwas grösser. Aus den Regressionsgeraden kann zusätzlich gelesen werden, dass die Wassertemperaturen am Wochenende vom Frühling bis in den Herbst auch bei gleichem Abfluss höher sind als an Arbeitstagen. Das bestätigt die Vermutung, dass die kälteren Wassertemperaturen unter der Woche, nicht nur durch die grösseren Wassermengen, sondern auch das kühle Wasser aus den Speicherstauseen verursacht wird. Für die

Wintermonate ist eine klare Unterscheidung nicht möglich. Bei den Steigungen kann hingegen kein systematischer Unterschied zwischen den Messungen am Wochenende und unter der Woche erkannt werden: in einzelnen Monaten nimmt die Wassertemperatur mit zunehmendem Abfluss unter der Woche stärker ab, in anderen Monaten ist die Abnahme an den Wochenende stärker.

4.4.3 Temperaturdifferenz versus Abfluss

Bei diesen Analysen sieht man, dass die Temperaturdifferenz (mit Ausnahme der Wintermonate) bei grossem Abfluss zunimmt. Die Wassertemperatur passt sich bei zunehmendem Abfluss weniger (langsamer) an die höhere Lufttemperatur (und somit meist höhere Gleichgewichtstemperatur des Wassers) an.

Im Winter, bei kühlen äusseren Bedingungen, kann die Wassertemperatur der Rhone höher als die eigentliche Gleichgewichtstemperatur sein. Bei diesen Bedingungen kühlt die Rhone bei grösserem Abfluss langsamer ab. Weil die Differenz aus Lufttemperatur minus Wassertemperatur in dieser Phase negativ ist, ist die Steigung der Regressionsgerade negativ (gut zu sehen in den Monaten Januar und Februar). Absolut betrachtet passt sich die Wassertemperatur bei kleinem Abfluss auch im Winter schneller an die Umgebung an

Bezüglich der Regressionsgeraden sind zwischen den Messungen am Wochenende und unter der Woche keine systematischen Unterschiede zu erkennen.

4.4.4 Temperatur- versus Abflussanomalien

Bei einem gegenüber dem 14-tägigen Mittel erhöhten Abfluss, nimmt die Wassertemperatur vom Frühling bis zum Herbst gegenüber dem 14-tägigen Mittel ab. Im Winter kann die Steigung auch ein inverses Vorzeichen haben. Dieses Ergebnis lässt sich wiederum durch die Eigenschaft erklären, dass eine grössere Wassermenge träger auf die äusseren klimatischen Einflüsse reagiert.

Die Regressionsgerade an den Wochenenden ist gegenüber den Arbeitstagen etwas nach oben verschoben (Ausnahmen Februar und März). Das heisst, bei einer gleich grossen Abweichung des Abflusses ist die Abweichung bei der Wassertemperatur an den Wochenende etwas grösser.

Die genauen Steigungen der Regressionsgeraden lassen sich wegen der grossen Streuung der Punkte nicht interpretieren.

4.4.5 Korrelation Einzugsgebietshöhe versus Temperatur

Alle im hydrologischen Jahrbuch veröffentlichten Temperaturmessungen des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) wurden ergänzt mit den im Rahmen des Rhoneprojekts gemessenen Wassertemperaturen der Rhone (Tabelle 18) zusammengetragen. Es wurde versucht einen Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen Monatstemperaturen und den Eigenschaften des Einzugsgebiets zu finden. Den besten Zusammenhang konnte dabei zwischen der mittleren Höhe des Einzugsgebietes und der Temperatur festgestellt werden.

Die BWG-Temperaturwerte beinhalten hydroelektrisch beeinflusste und natürliche Abflussregime. Ein klarer Unterschied zwischen diesen zwei Typen konnte nicht festgestellt werden.

Die BWG-Messungen wurden mit den im Rhoneprojekt durchgeführten Messungen der seitlichen Zuflüsse der Rhone ergänzt. Die durchschnittlichen Monatsdurchschnittstemperaturen wurden aus den bisher vorliegenden Temperaturmessungen bestimmt und die mittlere Höhe des Einzugsgebiets aus den Angaben im hydrologischen Atlas berechnet. Die zusätzlich verwendeten Daten sind in der Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Mittlere Monatstemperaturen der Rhonezuflüsse, welche im Rahmen des Rhoneprojektes gemessen wurden.

Fluss	Restwasser (am Messstandort)	Höhe des Messstandortes [müM]	mittlere Einzugsgebiets-höhe [müM]	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Lonza	nein	630	2380	2.9	3.2	5.5	7.1	7.1	7.7	8.2	8.8	8.2	7.3	4.9	4.0
Dala	nein	595	1742	5.1	6.1	6.1	7.0	8.1	10.1	10.6	11.1	9.3	9.1	6.6	5.4
Navisence	ja	527	2395	3.4	5.8	6.9	8.6	10.1	11.6	11.3	11.2	10.8	9.7	6.6	4.2
Borgne	ja	491	2413	2.8	3.1	5.1	6.7	7.9	10.7	11.1	11.1	9.0	7.7	4.6	4.1
Morge	ja	483	1689	3.0	4.5	6.1	7.8	9.3	11.1	12.9	16.1	10.5	10.2	4.4	4.8
Dranse	ja	460	2257	3.1	3.5	5.2	7.1	8.5	10.9	11.5	11.7	9.8	8.7	5.7	3.9
Turtmäna	ja	620	1799	2.3	2.3	3.1	5.0	-	7.6	-	9.4	6.5	6.4	3.9	2.9
Saltina	ja	670	2042	2.2	2.4	4.2	6.2	7.0	9.6	10.7	11.1	9.2	7.5	4.3	2.8
Vispa	ja	648	2661	2.7	3.2	4.5	6.7	6.8	9.2	8.7	8.5	8.0	7.8	4.5	3.3

Bei den untersuchten seitlichen Zuflüssen der Rhone muss man zwei unterschiedliche Flusstypen unterscheiden. Bei den einen Flüssen handelt es sich an der Messstelle um Restwasser mit einem stark reduzierten Abfluss, bei welchen das hydraulisch genutzte Wasser erst in der Rhone in das Gewässersystem zurückgeleitet wird. Bei den anderen Flüssen wurde das Wasser hydraulisch genutzt, aber schon vor der Messstelle in den Fluss zurückgeleitet.

Bei der Korrelation werden insgesamt 8 unbeeinflusste Flüsse, 7 hydraulisch genutzten Flüsse im Wallis, 11 weitere hydraulisch genutzte Flüsse in der übrigen Schweiz und 5 Restwasserstrecken im Wallis unterschieden (Tabelle 18 und 15). Neben der Erfassung von Unterschieden zwischen den unterschiedlichen Flusstypen, bestand ein weiteres Ziel der Untersuchungen darin aus der mittleren Einzugsgebietshöhe eines Flusses die Wassertemperatur eines natürlichen, unbeeinflussten Flusses vorauszusagen. Diese Resultate könnten dann verwendet werden, um Aussagen über die hypothetischen, natürlichen Wassertemperaturen der Rhonezuflüsse zu machen.

In der Abbildung 22 sind die Resultate der Auswertung der Monate April bis September dargestellt.

Tabelle 19: Mittlere Monatstemperaturen der Messstationen der BWG, welche für die Korrelationen verwendet wurden.

Fluss	Beinflusst (am Mess- standort)	Höhe des Mess- standortes [müM]	Mittlere Einzugs- gebiets- höhe [müM]	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Aare Brienzwiler	ja	570	2150	3.5	3.6	4.1	4.9	5.9	6.7	7.3	7.3	7.2	6.5	4.9	3.8
Birs Münchenstein	nein	268	740	5.3	5.6	7.4	9.3	12.0	13.9	16.2	16.6	14.3	11.0	7.7	5.9
Broye Payerne	nein	441	710	3.1	3.6	5.9	8.9	13.0	15.7	18.5	18.4	15.0	11.2	6.7	4.1
Emme Emmenbrücke	nein	638	1070	2.9	3.2	4.4	6.0	9.1	12.0	14.0	14.0	11.9	9.3	5.8	3.5
Engelberger Aa	ja	443	1620	4.1	4.2	5.5	6.8	7.6	8.4	9.3	9.6	8.9	7.8	5.8	4.5
Inn S-chanf	ja	1000	2350	0.5	0.7	2.7	5.0	6.2	7.3	8.6	8.8	8.0	6.0	2.5	0.8
Kleine Emme Littau	nein	431	1070	2.1	2.5	4.6	6.8	10.0	13.3	16.5	16.5	13.5	9.9	5.5	3.0
Linth Mollis	ja	436	1730	4.2	4.4	5.3	6.4	7.8	9.0	10.4	10.8	9.6	8.2	6.1	4.6
Lonza Blatten	nein	1520	2630	1.5	1.7	2.5	3.5	4.4	5.1	5.6	5.6	5.1	4.1	2.6	1.6
Lütschine Gsteig	nein	585	2050	2.5	3.1	4.8	6.0	7.0	7.2	7.0	6.7	6.6	6.0	4.5	3.1
Muota Ingenbohl	ja	438	1360	3.7	4.1	5.7	7.3	7.6	8.0	9.4	10.9	10.4	8.9	6.5	4.5
Reuss Seedorf	ja	438	2010	3.2	3.5	4.5	5.7	7.0	8.3	9.7	9.9	8.9	7.1	4.8	3.4
Rhein Diepoldsau	ja	410	1800	3.3	3.7	5.4	7.2	8.9	10.0	12.1	13.0	11.0	8.8	5.9	4.0
Rhone Porte du Scex	ja	377	2130	4.0	4.5	5.6	7.2	8.9	9.5	9.8	9.4	8.8	7.5	5.5	4.2
Rhone Sion	ja	484	2310	3.8	4.5	6.1	7.7	8.8	8.9	8.8	8.5	8.4	7.3	5.4	4.1
Saane Gümnenen	ja	500	NaN	3.7	3.4	4.7	7.0	9.7	12.0	14.5	15.8	14.9	12.3	8.6	5.4
Thur Andelfingen	nein	356	770	3.1	3.6	5.8	8.5	12.4	15.3	17.7	17.5	14.7	11.0	6.7	4.0
Ticino Riazzino	ja	200	1680	4.1	4.9	6.6	8.1	9.3	11.0	13.0	14.0	12.2	9.5	6.7	4.8
Worble Ittigen	nein	522	NaN	5.2	5.3	7.2	8.9	11.9	13.5	15.3	15.7	13.3	10.9	8.0	5.9

Die Regressionsgeraden für die hydroelektrisch beeinflussten Flüsse im Wallis und diejenigen in der übrigen Schweiz weisen jeweils einen ähnlichen Verlauf aus, so dass sie zusammen betrachtet werden können. Die Wassertemperaturen nehmen bei ihnen mit zunehmender Höhe der Einzugsgebiete ab. Es entspricht der Erwartung, dass Wasser aus höheren Lagen kühler ist. Die Höhenabhängigkeit variiert von 1 bis zu 4°C pro 1000 m (Ausnahme Wallis im April). Das Bestimmtheitsmass der Regressionen ist allerdings so klein, dass keine genauen Vorhersagen möglich sind. Das ist nachvollziehbar, da die anthropogene Beeinflussung in allen Flüssen unterschiedlich ist.

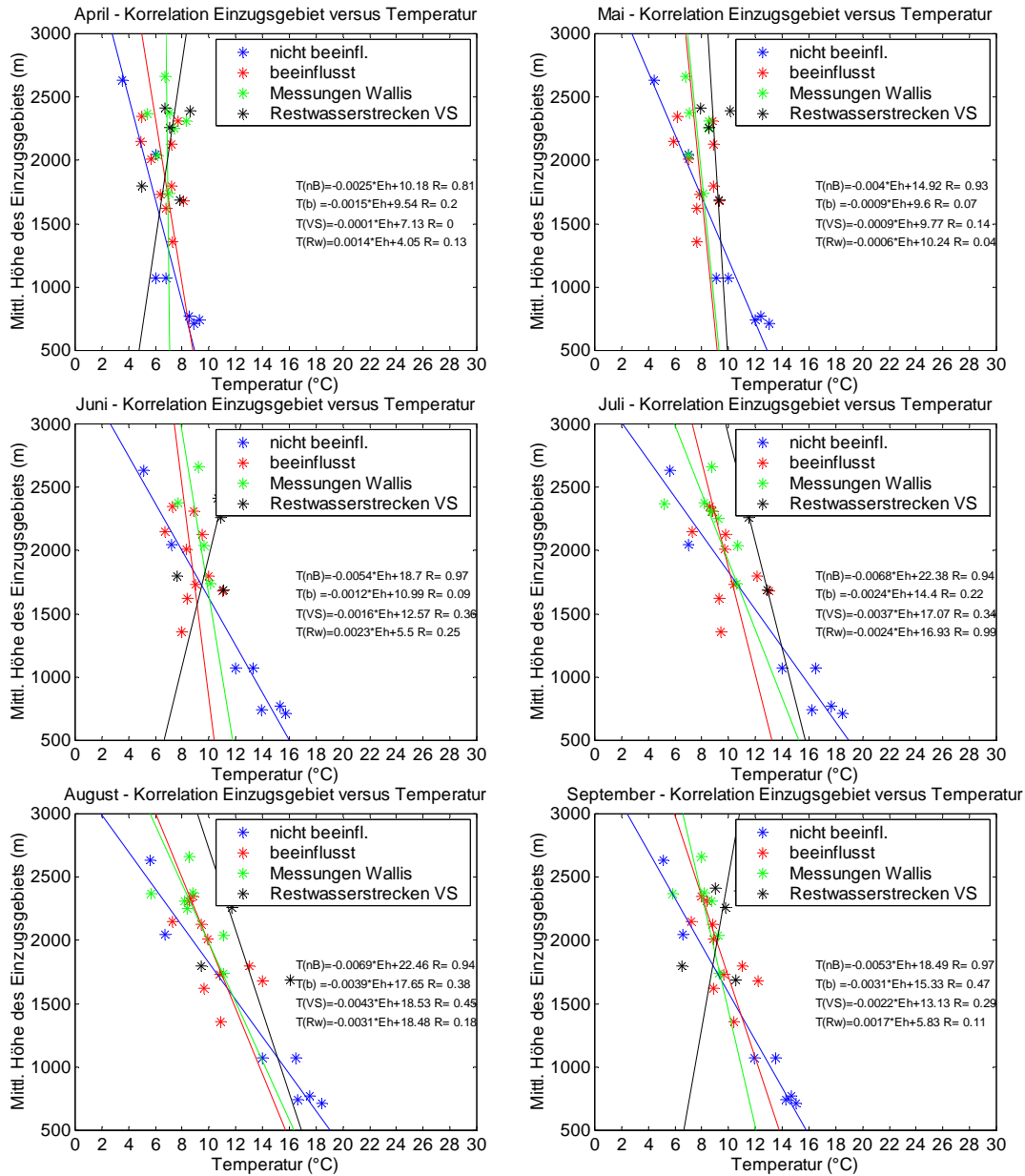


Abbildung 22: Regressionsgeraden für die Wassertemperatur versus die Einzugsgebietshöhe für verschiedene beeinflusste und unbeeinflusste Flüsse der Schweiz in den Sommermonaten (Angaben zu den Messstellen finden sich in der Tabelle 18 und Tabelle 19). Die Messungen aus dem Wallis wurden separat aufgezeichnet. Zusätzlich sind die Regressionsgleichungen inklusive dem Bestimmtheitsmass angegeben.

Die Regressionsgerade der untersuchten unbeeinflussten Flüsse hat in jedem Monat eine grössere Höhenabhängigkeit als diejenige der beeinflussten Flüsse. Bei den unbeeinflussten Fließgewässern variiert die Höhenabhängigkeit zwischen 2.5 und 7°C pro 1000m. Unbeeinflusste Flüsse mit einem tiefen Einzugsgebiet haben höhere Temperaturen als beeinflusste Flüsse mit einem Einzugsgebiet in gleicher

Höhenlage. Bei höheren Einzugsgebieten sind die Temperaturen der unbeeinflussten Flüsse tiefer. Das Bestimmtheitsmass für diese die unbeeinflussten Flüsse ist deutlich besser und bewegt sich über 0.9 (einzig im April ist das R^2 nur 0.8). Nach den bisherigen Erkenntnissen sollten die unbeeinflussten Flüsse im Sommer höhere Wassertemperaturen haben, da den beeinflussten Flüssen durch die hydraulische Nutzung Reibungswärme entzogen wird und die Energieaufnahme auf der Restwasserstrecke kleiner ist. Bei der Regressionsanalyse wird diese These nur für tiefe Lagen bestätigt.

Das Ergebnis der Regressionsanalyse kann trotz des guten Bestimmtheitsmasses nur bedingt auf die seitlichen Zuflüsse im Wallis übertragen werden. Erstens ist das gute Resultat auf die geringe Anzahl (8) untersuchter Flüsse zurückzuführen. (Wenn weniger Flüsse untersucht werden, wird auch das Bestimmtheitsmass besser.)

Zweitens wird das Ergebnis stark durch die zur Verfügung stehenden Flüsse geprägt. So beinhaltet die Regression 4 Flüsse mit einem sehr tiefen Einzugsgebiet und relativ geringen Wassermengen. (Das sind auch die Gründe, weshalb diese Flüsse für die hydroelektrische Nutzung uninteressant sind.) Die Temperaturen dieser Flüsse sind sehr ähnlich, was die Variation der Untersuchungspunkte stark einschränkt und somit ein besseres Bestimmtheitsmass ergibt.

Drittens berücksichtigt man die Messstelle der Lonza in Blatten. Blatten liegt hoch auf 1520 m.ü.M. An dieser Stelle ist das Wasser noch kalt, da die Fliegsstrecke bis zur Messstelle zu kurz ist um das Wasser durch die Reibungswärme und das Klima zu erwärmen. Da diese Messungen die einzige aus einem hohen Einzugsgebiet ist, hat sie einen grossen Einfluss auf die Regressionsgerade und führt so zu tiefen Wassertemperaturen in hohen Lagen.

Auf den Restwasserstrecken nimmt die Wassertemperatur nach der Regressionsgerade teilweise mit zunehmender Höhe des Einzugsgebietes zu. Dieses Resultat ist auf die Auswahl der Flüsse zurückzuführen und kann nicht interpretiert werden. Es zeigt nur auf, dass für Restwasserstrecken andere Eigenschaften, wie z.B. der Restwasseranteil, einen grösseren Einfluss auf die Wassertemperatur haben als die Einzugsgebietshöhe. (Die Einzugsgebietshöhe ist in vielen Fällen sowieso nicht mehr korrekt, da das Wasser aus den höheren Lagen abgeleitet wurde und sich im Fluss nur noch Wasser aus tieferen Lagen befindet.)

4.4.6 Auswertung der Wintermonate:

In der Abbildung 23 sind die Resultate der Auswertung der Wintermonate (Oktober bis März) dargestellt. Die Temperaturen der beeinflussten Flüsse im Wallis und in der übrigen Schweiz nehmen auch im Winter mit zunehmender Höhe der Einzugsgebiete ab (1 bis 3°C pro 1000 m).

Die Regressionsgerade der unbeeinflussten Flüsse ergibt in allen Wintermonaten für die gleiche Höhe eine kleinere Temperatur als die Geraden der beeinflussten Flüsse im Wallis und in den übrigen Gebieten der Schweiz, wobei die Differenz mit zunehmender Höhe des Einzugsgebietes abnimmt.

Dieses Resultat kann durch die kleinere Abflussmenge der analysierten, unbeeinflussten Flüsse erklärt werden, da die beobachteten beeinflussten Flüsse grössere Abflussmengen haben und so stärker auf die kühlenden äusseren Bedingungen reagieren.

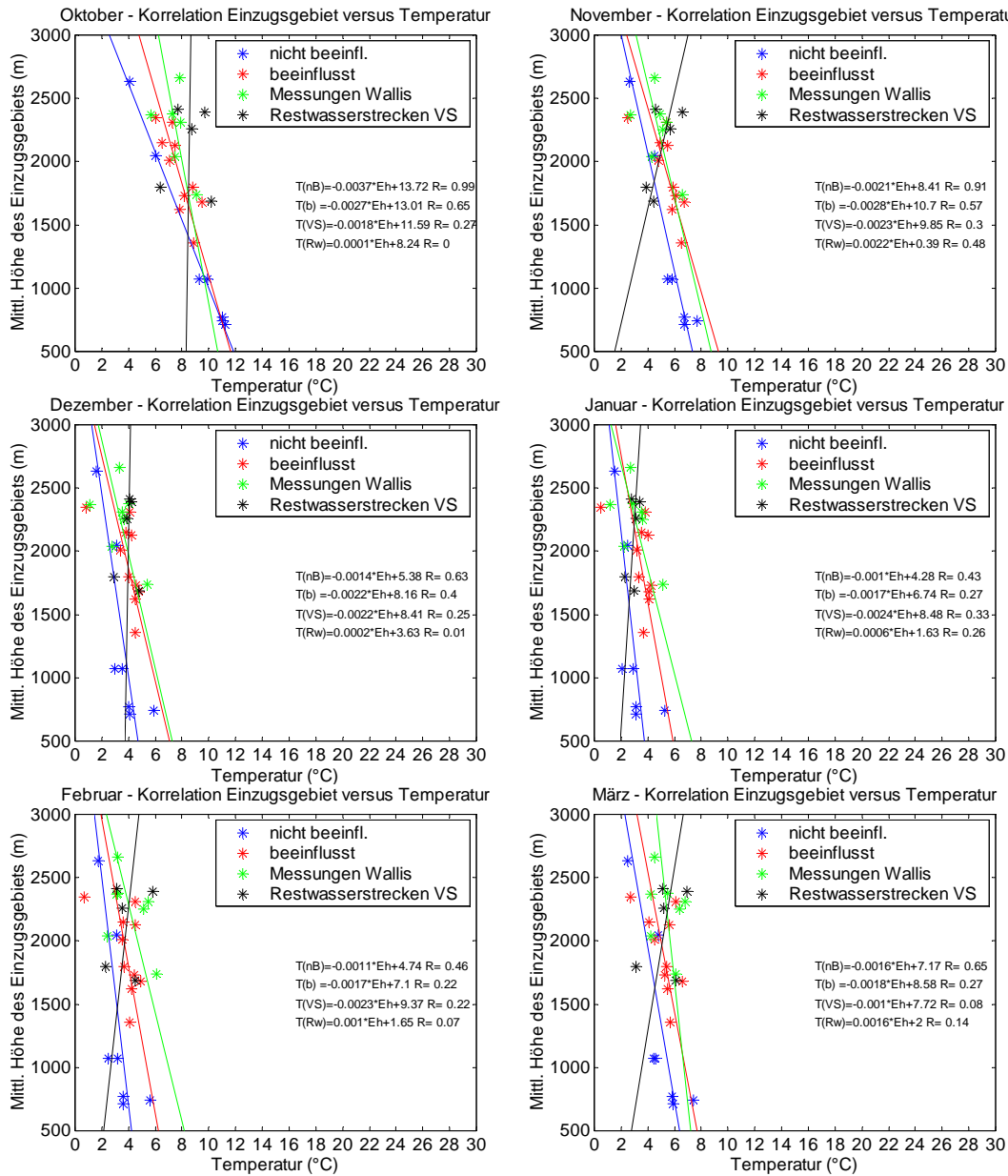


Abbildung 23: Regressionsgeraden für die Wassertemperatur versus die Einzugsgebietshöhe für verschiedene beeinflusste und unbeeinflusste Flüsse der Schweiz in den Wintermonaten (Angaben zu den Messstellen in der Tabelle 19). Die Messungen aus dem Wallis wurden separat aufgezeichnet. Zusätzlich sind die Regressionsgleichungen inklusive dem Bestimmtheitsmass angegeben.

Die Regressionsgeraden der Restwasserstrecken haben auch im Winter einen umgekehrten Verlauf, so dass die Temperatur mit zunehmender Höhe des Einzugsgebietes zunimmt, was auch hier auf die unterschiedlichen Restwasserszenarien zurückzuführen ist.

Ein Vergleich der Temperaturwerte im Wallis mit Werten aus anderen Einzugsgebieten mit ähnlichen Einzugsgebietshöhen bringt leider nicht viel. Die analysierten unbeeinflussten und die beeinflussten Flüsse sind zu verschieden. Die Überlage-

zung von Einzugsgebiet-spezifischen Eigenheiten sind zu gross um Unterschiede zwischen den beiden Flusstypen erkennen zu können.

Das Bestimmtheitsmass der Regressionsanalyse der unbeeinflussten Flüsse ist zumindest im Sommer ziemlich gut. Trotzdem bleibt die Übertragung der Resultate auf die natürlichen Zustände der Rhonezuflüsse im Wallis problematisch, da die Analyse stark von den spezifischen Gegebenheiten der untersuchten Flüsse abhängig ist und die meisten in die Regression einbezogenen Fliessgewässer deutlich andere Eigenschaften als die Flüsse im Wallis haben (kleinere Einzugsgebietshöhe, kleinere Abflussmengen).

4.5 ABSCHÄTZUNGEN FÜR ENERGIEBILANZ UND TEMPERATUR DER RHONE

4.5.1 1. Näherung für unbeeinflusste Wassertemperatur

Die aktuelle Wassertemperatur der Rhone lässt sich in 1. Näherung aus der historischen Wassertemperatur mit Hilfe des veränderten Abflusses und der Abhängigkeit der Temperatur vom Abfluss bestimmen (Formel 4). Der turbinierte Abfluss wurde aus dem Vergleich von Arbeitstagen und Wochentagen berechnet. Für die turbinierte Abflussmenge am Wochenende, welche aus diesem Vergleich nicht bestimmt werden konnte, wurde gemäss der Abschätzung im Kapitel 4.3 ein Wert von 26 m³/s gewählt, welcher zu den vorher bestimmten Abflüssen dazugezählt wird.

$$T_{mitWKW} = T_{ohneWKW} + \frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q_{WKW} \quad \text{Formel 4}$$

Tabelle 20: Resultate der Abschätzung für die Wassertemperatur ohne Kraftwerkseinfluss in 1. Näherung und historische Referenztemperaturen aus Kapitel 4.1.3.

	Gemessene Temperatur mit WKW [°C]	Geschätzter turbiniertes Abfluss [m ³ /s]	dT/dQ [°Cs/m ³]	Geschätzte Temperatur ohne WKW (Formel 4) [°C]	Historische Wassertemp. [°C]	Diff. [°C]
Januar	4.1	69.5	0.0014	4.0	1.9	2.1
Februar	4.6	71.5	-0.0023	4.8	2.8	2.0
März	5.8	70.3	0.0000	5.8	5.4	0.4
April	7.3	58.3	-0.0067	7.7	7.6	0.1
Mai	9.0	55.8	-0.0031	9.1	9.9	-0.8
Juni	9.5	62.4	-0.0061	9.9	9.6	0.3
Juli	9.8	54.0	-0.0033	10.0	9.9	0.1
August	9.3	65.6	-0.0061	9.7	9.5	0.2
September	8.7	72.0	-0.0076	9.3	8.5	0.8
Oktober	7.7	66.0	-0.0003	7.7	7.0	0.7
November	5.7	67.8	0.0089	5.1	3.6	1.5
Dezember	4.5	62.2	0.0150	3.5	1.5	2.0
Jahresmittel	7.1	64.6	-0.0059	7.5	6.5	1.0

Die berechneten Resultate für die 1. Näherung sind in der Tabelle 20 zusammengefasst. Die Gradienten dT/dQ von Januar bis März und im Oktober sind nicht eindeutig. Die 1. Näherung ist mit Ausnahme der Monate Juli, August und September noch weit von den historischen Temperaturen entfernt. Gründe liegen in der Nichtberücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren (Wasserentnahme, Restwasserstrecken, meteorologische Einflüsse), der Ungenauigkeit der Gradienten dT/dQ und der oben besprochenen Fehler beim Vergleich zwischen Wochentagen und Wochenenden. Die Korrektur geht (mit Ausnahme der Monate Februar, März, August, September und Oktober) jedoch in die richtige Richtung. Eine verbesserte Näherung wird im Folgenden durchgeführt.

4.5.2 Verbesserte Schätzung für unbeeinflusste Wassertemperatur

Die Veränderung des Abflusses durch den Kraftwerksbetrieb lässt sich wiederum durch den turbinieren Abfluss und zusätzlich durch die Wasserentnahme beschreiben. Der turbinierte Abfluss ist in 1. Näherung durch den Vergleich von Wochenenden und Arbeitstagen bekannt.

Die Energiebilanz von heute lässt sich auch mit einer groben Abschätzung bestimmen (Formel 5):

$$\frac{E_{\text{aktuell}}}{\rho c_p} = Q_{\text{mitWKW}} \cdot T_{\text{mitWKW}} = Q_{\text{ohneWKW}} \cdot T_{\text{ohneWKW}} + \Delta Q_{\text{turbiniert}} \cdot T_{\text{turbiniert}} - \Delta Q_{\text{Fassung}} \cdot (T_{\text{ohneWKW}} + \frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q_{\text{Fassung}})$$

Formel 5

Tabelle 21: Resultate der Abschätzung für die Wassertemperatur ohne Kraftwerkseinfluss mittels Vergleich von Messungen an Arbeitstagen und Wochenenden.

Monat	Temperatur mit WKW [°C]	Geschätzter gefasster Abfluss [m ³ /s]	dT/dQ [°Cs/m ³]	Temperatur ohne WKW (Formel 5) [°C]	Historische Wassertemp. [°C]	Diff. [°C]
Januar	4.1	4	0.0014	3.9	1.9	2.0
Februar	4.6	-8	-0.0023	5.6	2.8	2.8
März	5.8	0	0.0000	6.6	5.4	1.2
April	7.3	16	-0.0067	8.8	7.6	1.2
Mai	9.0	54	-0.0031	9.7	9.9	-0.2
Juni	9.5	134	-0.0061	9.7	9.6	0.1
Juli	9.8	157	-0.0033	10.5	9.9	0.6
August	9.3	150	-0.0061	9.5	9.5	0.0
September	8.7	100	-0.0076	9.1	8.5	0.6
Oktober	7.7	37	-0.0003	8.5	7.0	1.5
November	5.7	20	0.0089	6.1	3.6	2.5
Dezember	4.5	10	0.0150	3.6	1.5	2.1
Jahresmittel	7.1	56	-0.0059	7.6	6.5	1.1

Bei dieser Abschätzung wird der geschätzte turbinierte Abfluss und das dT/dQ aus der Tabelle 20 benützt. Diese Näherung führt aufgrund der starken Vereinfachung und ungenauer Eingangsparameter sogar noch zu schlechteren Schätzwerten als die vorige Annäherung.

4.5.3 Vergleich der Messwerte in Sion und Porte du Scex

Oberhalb Sion wird Wasser für die Wasserkraftnutzung entnommen, welches vor Porte du Scex wieder in die Rhone eingeleitet wird. Aus dem Vergleich der Wassertemperaturen der vom turbinierten Wasser nur schwach beeinflussten Stelle in Sion mit dem von den Kraftwerken stark beeinflussten Stelle in Porte du Scex kann auf den Einfluss der Wasserkraftnutzung auf die Wassertemperatur geschlossen werden.

Im Winter nimmt die Wassertemperatur zwischen Sion und Porte du Scex (100 m Höhenunterschied) um 0.2°C zu. Dies liegt in der Grössenordnung der Erwärmung des Wassers durch die Reibungswärme um 0.25°C pro 100 m Höhendifferenz. Im Sommer kann die Erwärmung durch die starke Einstrahlung bis zu 1°C ausmachen. Auffallend ist die Abnahme der Wassertemperatur zwischen Sion und Porte du Scex um 0.4°C in den Monaten März und April. Zu diesem Zeitpunkt sind die Stauseen fast leer und die Wassertemperaturen des zwischen Sion und Porte du Scex eingeleiteten turbinierten Wassers ist sehr tief (kaltes Oberflächenwasser).

Tabelle 22: Resultate der Abschätzung für die Wassertemperatur ohne Kraftwerkseinfluss aus dem Vergleich der Messungen in Sion (von den Wasserkraftwerken schwach beeinflusst) mit Porte du Scex (von den Wasserkraftwerken stark beeinflusst).

Wassertemp. [°C]	Temperatur in Sion (1974-2001)	Temperatur in Porte du Scex (1971-2001)	Differenz PdS – Sion
Januar	3.8	4.1	0.3
Februar	4.5	4.6	0.1
März	6.1	5.7	-0.4
April	7.7	7.3	-0.4
Mai	8.8	9	0.2
Juni	8.9	9.5	0.6
Juli	8.8	9.8	1.0
August	8.5	9.4	0.9
September	8.5	8.8	0.3
Oktober	7.4	7.6	0.2
November	5.4	5.6	0.2
Dezember	4.1	4.3	0.2
Jahresmittel	6.9	7.1	0.2

4.6 VERGLEICH MIT ANDEREN SCHWEIZER FLÜSSEN

Obwohl die Wassertemperaturen der Schweizer Flüsse sehr unterschiedlich sind, werden im Folgenden die Mittelwerte des Jahres 2002 von einigen Schweizer Flüssen verglichen. Die Rhone in Porte du Scex ist im Vergleich zu Rhein und Ticino mit ähnlich hoch gelegenen Messstationen deutlich kälter (Tabelle 23). Vor allem die Sommermaximalwerte sind deutlich kleiner. Auch bei der Aare, welche ebenfalls einen hohen Vergletscherungsgrad und eine starke Beeinflussung durch Wasserkraftwerke aufweist, werden über das ganze Jahr vergleichbar tiefe Wassertemperaturen gemessen. Sogar bei der hoch gelegenen Messstation beim Inn werden höhere Sommermaxima gemessen als bei der Rhone und der Aare.

Tabelle 23: Temperaturmessungen des BWG in verschiedenen Flüssen der Schweiz für das Jahr 2002 (BWG 2002)

Messort	Temperatur [°C] (min-max)	Abfluss [m ³ /s] (max)	Höhe der Messstation [m.ü.M.]	Anteil Vergletscherung [Prozent]
Rhone, Porte du Scex	7.6 (1.4-12.9)	181 (690)	377	14.3%
Rhone, Sion	7.4 (6.5-12.2)	104 (540)	484	18.4%
Rhein, Diepoldsau ⁸	8.2 (0.2-16.1)	248 (1880)	410	1.4%
Ticino, Bellinzona	9.3 (1.1-18.8) ⁹	74.5 (1360)	220	0.7%
Aare, Brienzwiler	6.1 (1.2-12.4)	40.5 (360)	570	21%
Lonza, Blatten	4.0 (0.3-11.8)	4.68 (31.0)	1520	36.5%

4.7 VERGLEICH MIT REFERENZFLUSS TAGLIAMENTO

Der Tagliamento, der letzte grosse weitgehend naturnahe Alpenfluss, wird als Referenzfluss verwendet. Er ist einer der letzten grossen Alpenflüsse, der durch Kanalisierung und Wasserkraftnutzung (noch) nicht stark beeinflusst wird. Er verläuft im südöstlichen Alpengebiet in Nord-Süd-Richtung. Mit der Rhone ist der Tagliamento orographisch vergleichbar, jedoch nicht bezüglich Längsausrichtung sowie Lage gegenüber den Alpen und geografischer Breite.

⁸ entspricht dem Standort Schmitter

⁹ Temperaturmessung bei Riazzino (Höhe der Messstation: 200 m.ü.M. und 1% Vergletscherung)

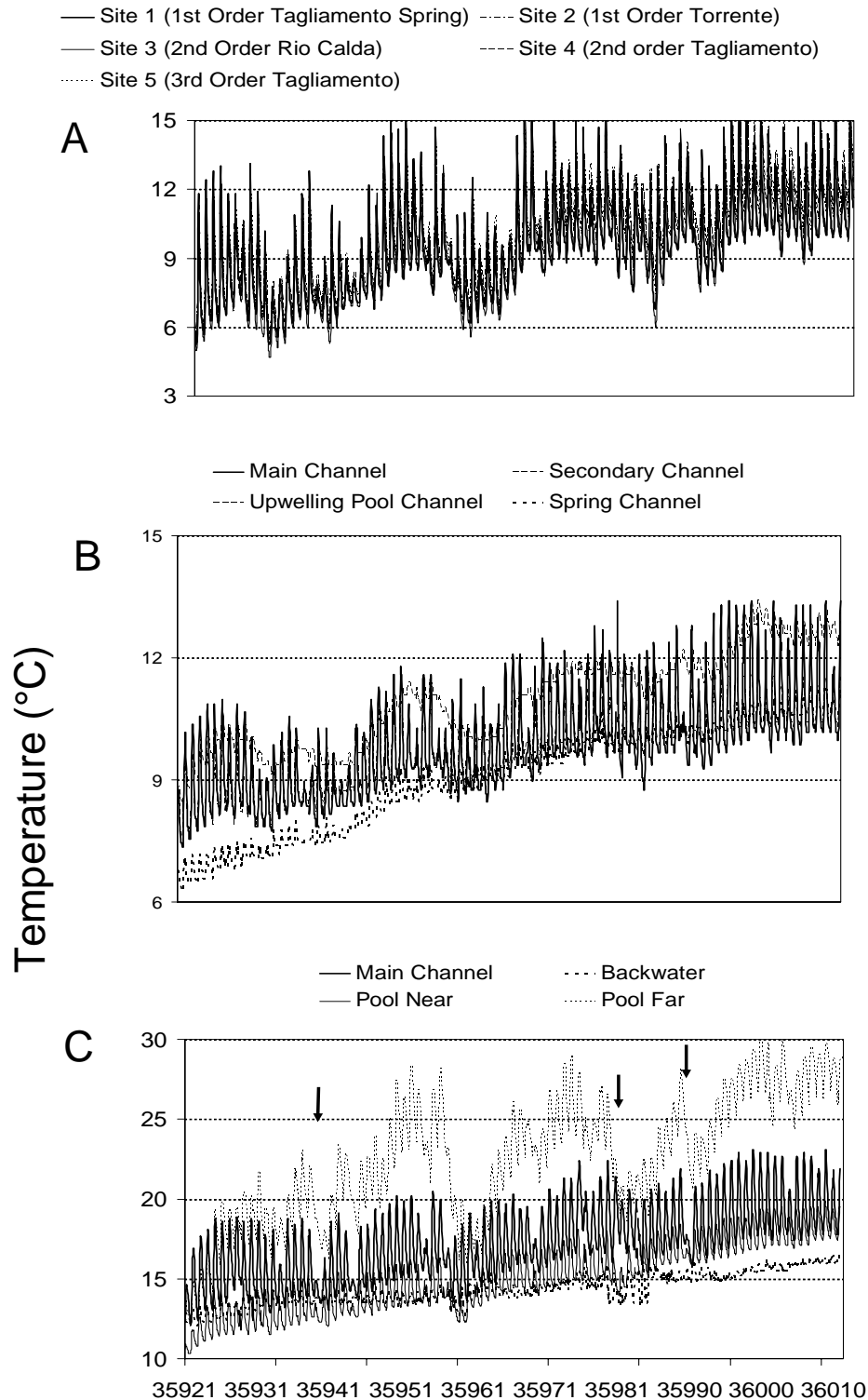


Abbildung 24: Gemessene Wassertemperaturen in verschiedenen Habitaten des Tagliamentos und seinen Zuflüssen von Mai bis August 1998 (aus Tockner et al. 2000). A: Quellfluss (1. und 2. Ordnung) und drei Zuflüsse (im Flusskilometer 1-5), B: Schwemmflächen im Quellgebiet (Flusskilometer 13) und C: Schwemmfläche im Tiefland (Flusskilometer 120).

Bei den Temperaturmessungen im Tagliamento fallen v.a. die grossen Temperaturunterschiede über den breiten Flussquerschnitt auf (Arcscott et al. 2001). So beträgt der Temperaturunterschied bei Schwemmebenen im Tiefland bis zu 15°C (Abbildung 23 aus Tockner et al. 2000) zwischen verschiedenen Lebensräumen (Hauptfluss, Seitenarme, Totarme und Grundwasseraufstösse). Die Breite der aktiven Aue beträgt im Mittellauf bis zu 1.5 km. In Sommer und Herbst überschritten die Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Habitaten im Tiefland sogar die Temperaturunterschiede entlang des Hauptflusses mit einer Länge von 120 km und einem Höhenunterschied von 5 bis 1100 m.ü.M.

4.8 ZUSAMMENFASSUNG: WASSERTEMPERATUR VOR UND NACH KORREKTION BZW. KRAFTWERKSBAU

Über die **Wassertemperaturen vor der 1. Rhonekorrektion** liegen keine Daten vor. Im Tagliamento, einem praktisch unbeeinflussten Fluss im südöstlichen Alpenraum, gibt es über den Flussquerschnitt grosse Temperaturvariationen von bis zu 15°C (Arcscott et al. 2001). Die Unterschiede in der Wassertemperatur zwischen verschiedenen Lebensräumen im Tiefland sind im Sommer und Herbst grösser als die Temperaturunterschiede im Längsverlauf des 120 km langen Hauptflusses. Es kann vermutet werden, dass in der Rhone vor der Korrektion ähnliche Verhältnisse wie im Tagliamento herrschten.

Die Wassertemperaturen in der unkorrigierten Rhone wiesen aufgrund der unterschiedlichen Abflussverhältnisse, Aufenthaltszeiten und Wassertiefen im natürlichen Gerinne grössere Variationen v.a. im Querschnitt zum Fluss auf. Die Wassertemperaturen haben im Sommer in Totarmen und Stillwasserzonen deutlich höhere und im Winter auch tiefere Werte (bis 0°) erreicht als heute. Das Wasser in den Seitenbächen und im Hauptstrombereich der Rhone dürfte wegen dem grossen Einfluss der Vergletscherung aber auch im Sommer relativ kalt geblieben sein. Die **Wassertemperaturen nach der 1. Rhonekorrektion und vor dem Bau der Wasserkraftwerke** sind im Jahresmittel vergleichbar mit den heutigen Werten. Zwei historische Messungen von Forel (1892) und Uetrecht (1906) können für Vergleichszwecke verwendet werden, obwohl die Wassertemperatur nur einmal am Tag gemessen wurde. Aufgrund des relativ repräsentativen Abflusses werden die Temperaturmessungen im Winterhalbjahr 1886 und diejenigen aus dem Sommerhalbjahr 1904 verwendet. Die historischen Messungen weisen darauf hin, dass das Wasser früher im Winter mit Temperaturen zwischen 0 und 2°C deutlich kühler war (Mittelwert bei ca. 1.6°C). Im Sommer waren die historischen Monatsmittel mit maximal 11°C leicht höher als heute mit 9.8°C im Mittel. Schwall/Sunk-Effekte mit kurzfristigen Temperaturänderungen fehlten vor dem Bau der Wasserkraftwerke.

Die qualitativen Gründe für die höheren Werte im Winter und den tieferen Werten im Sommer bei der **Wassertemperatur nach dem Bau der Wasserkraftwerke** liegen in der Speicherung des Wassers und der Turbinierung.

Durch die Speicherung des Wassers in den Stauseen werden rund 30% des Jahresabflusses vom Sommer in den Winter verlagert. Der Abfluss im Winter ist

deutlich grösser als vor dem Bau der Wasserkraftwerke. Durch den vergrösserten Abfluss kühlt auch die Rhone im Winter weniger stark aus. Das turbinierte Wasser aus den Stauseen ist im Winter wärmer als das Rhonewasser und führt deshalb zu einer Erwärmung. Im Sommer ist das turbinierte Wasser hingegen kühler und führt deshalb zu einer Abkühlung.

Heute ist an den Wochenenden der Abfluss in der Rhone wegen der geringeren Stromproduktion rund $40 \text{ m}^3/\text{s}$ geringer als während Arbeitstagen. Vom zusätzlichen Abfluss von $55 \text{ m}^3/\text{s}$, welcher aus dem Vergleich der Abflussmessungen vor und nach dem Kraftwerksbau hergeleitet werden kann, wird rund $26 \text{ m}^3/\text{s}$ an den Wochenenden und $66 \text{ m}^3/\text{s}$ während der Woche turbiniert. Die Wassertemperaturen der Rhone sind an den Wochenenden bei allen Monatsmitteln um rund 0.3°C grösser als unter der Woche, wenn mehr Kraftwerke in Betrieb sind. Da es auch bei der vom Kraftwerksbetrieb unbeeinflussten Lufttemperatur einen Unterschied zwischen Wochenenden und Arbeitstagen gibt, muss es auch noch kraftwerksunabhängige Gründe für die Diskrepanz bei den Temperaturen geben. In den warmen Monaten sind die tieferen Wassertemperaturen unter der Woche eine Folge der erhöhten Einleitung von kaltem Wasser aus den Stauseen.

Mit einfachen Abschätzungen für unbeeinflusste Wassertemperaturen werden nur schlechte Näherungen gemacht, die Korrekturen gehen jedoch in die richtige Richtung.

Aus den Regressionsanalysen folgt, dass in den warmen Monaten die Wassertemperatur mit zunehmendem Abfluss abnimmt. Ein Vergleich der Temperaturwerte im Wallis mit Werten aus anderen Einzugsgebieten mit ähnlichen Einzugsgebietshöhen bringt keine neuen Erkenntnisse. Die analysierten unbeeinflussten und die beeinflussten Flüsse sind zu verschieden. Offensichtlich ist der Kraftwerkseinfluss nicht gross genug, dass er aus einem solchen Vergleich quantifiziert werden könnte. Das Bestimmtheitsmass der Regressionsanalyse der unbeeinflussten Flüsse ist zumindest im Sommer ziemlich gut. Trotzdem bleibt die Übertragung der Resultate auf die natürlichen Zustände der Rhonezuflüsse im Wallis problematisch, da die Analyse stark von den spezifischen Gegebenheiten der untersuchten Flüsse abhängig ist und die meisten in die Regression einbezogenen Fließgewässer deutlich andere Eigenschaften als die Flüsse im Wallis haben (kleinere Einzugsgebietshöhe, kleinere Abflussmengen). Im Sommer können die Resultate zumindest als Vergleichswerte herangezogen werden; im Winter haben sie jedoch keine Aussagekraft. Der Höhengradient bei den nicht beeinflussten Flüssen ist im August mit 0.7° pro 100 m Höhenunterschied genau gleich gross wie der adiabatische Höhengradient der Luft.

5 ANTHROPOGENE EINFLÜSSE AUF DEN WÄRMEHAUSHALT DER RHONE

Die Beiträge der Ursachen für die Veränderungen des natürlichen Wassertemperaturhaushalts sind schwierig abzuschätzen (Forstenlechner et al. 1997). Die verschiedenen Einflüsse können sich kompensieren oder auch verstärken, was eine getrennte Untersuchung der Effekte einschränkt. Die Auswirkungen variieren örtlich und zeitlich stark. Trotzdem soll hier der Einfluss der verschiedenen Ursachen qualitativ und sofern möglich quantitativ abgeschätzt werden. Die Einflüsse werden im Folgenden nach ihrer (anthropogenen) Ursache gruppiert diskutiert. In der Abbildung 25 ist die örtliche Verteilung der Effekte in den Gewässersystemen dargestellt und in der Tabelle 24 sind die zeitlichen Skalen zusammengefasst.

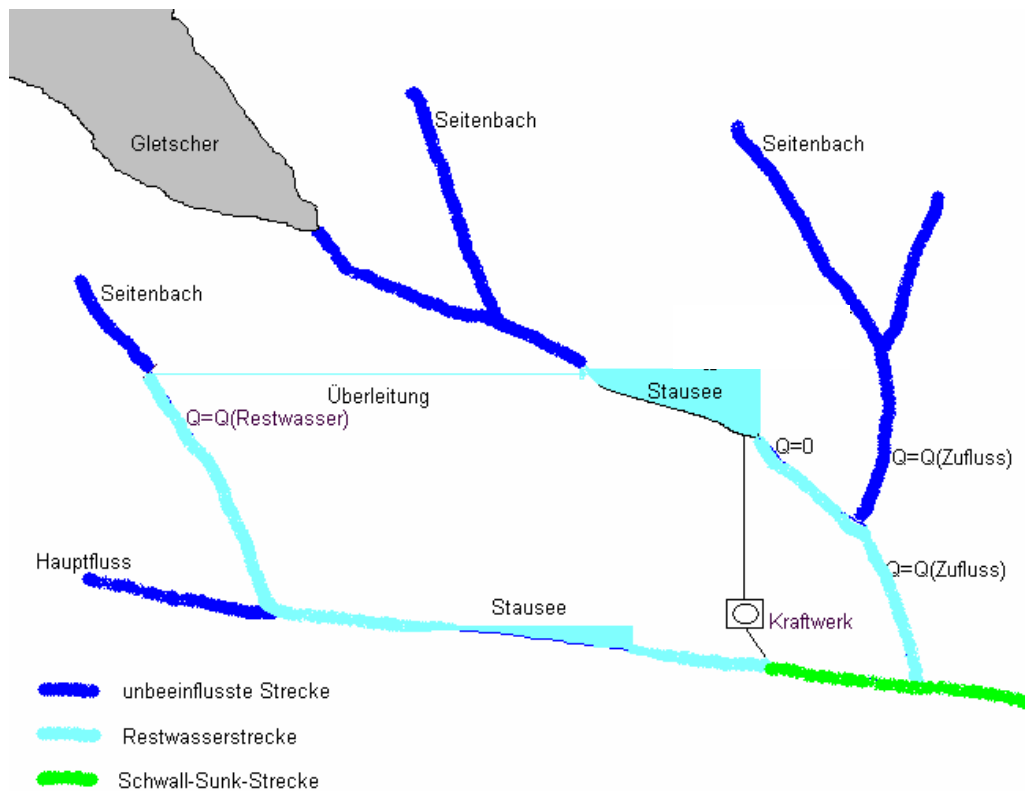


Abbildung 25: Unterteilung der durch die Wasserkraftnutzung beeinflussten Flusstrecken.

Tabelle 24: Zeitskalen der Beeinflussung der Wassertemperatur

Zeitskala	Zeiteinheit	Effekt
	Minuten	Schwall/Sunk
Kurzfristig	Stunden	Reservoir- und Entsanderspülungen
	Tage	Temperaturerhöhung/-erniedrigung durch Restwassersituation
Mittelfristig	Monate	Schneeschnmelze
	Jahreszeiten	Speicherung des Wassers in Reservoiren
	Jahre	
Langfristig	Jahrzehnte	Klimatische
	Jahrhunderte	Veränderungen

5.1 ENERGIEBILANZEN

Die Energiebilanz wurde mit der Formel 6 aus den gemessenen Abfluss- und Temperaturdaten zusammengestellt. Bei der Energiebilanz werden die Auswirkungen der Änderung des Wasser- und Temperaturhaushaltes zusammengefasst.

$$P = \rho \cdot c_p \cdot Q \cdot \Delta T = 4.182 \cdot 10^6 \frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \cdot Q \cdot \Delta T \quad \text{Formel 6}$$

P = Leistung [W]

Q = Abfluss [m^3/s]

ΔT = Abkühlung des Wassers durch die Nutzung [$^\circ C$]

In der Abbildung 26 sind die mit obiger Formel berechneten Energiemengen berechnet, welche die Rhone bei einer Referenztemperatur von $0^\circ C$ in den Genfersee einträgt. Der Energiehaushalt vor der Kanalisierung kann leider wegen fehlender Wassertemperaturmessungen nicht genau quantifiziert werden. Aus den gemessenen Abflusswerten von 1916 bis 1934 und mit Hilfe der Temperaturmessungen aus dem Jahr 1886 im repräsentativen Winterhalbjahr und 1904 für das Sommerhalbjahr kann er aber recht gut abgeschätzt werden.

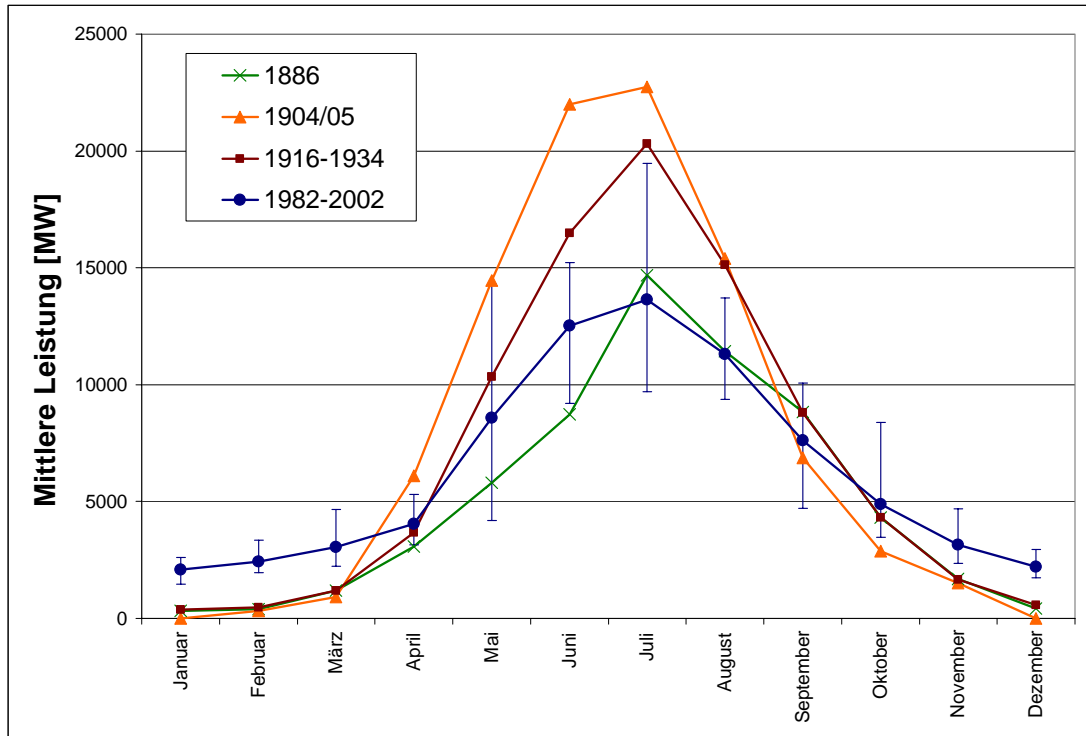


Abbildung 26: Vergleich der mittleren in den Genfersee eingebrachten Wärmeleistungen (Referenztemperatur 0°C) der Rhone bei Porte du Scex von 1886, 1904/05, dem Mittel aus den Jahren 1982 bis 2002 (inklusive Extremwerte) und einer Abschätzung für die mittlere Leistung vor dem Kraftwerksbau (aus dem mittleren Abfluss 1916-1934 und den Temperaturen des Winterhalbjahres 1886 und des Sommerhalbjahres 1904).

Die Energie, welche in den letzten zwanzig Jahren in den Genfersee eingetragen wurde, ist im Winter deutlich grösser als früher (höhere Temperaturen und grössere Abflussmengen). Im Jahr 1904/05 war der Energieeintrag im Sommer höher als heute (höhere Temperaturen, grösserer Abfluss). Wegen des geringen Abflusses war der Energieeintrag im Sommer 1886 geringer als heute.

Wenn man den Energieinhalt für das ganze Jahr betrachtet, war der Energieeintrag im Jahr 1904/05, auch ohne die fehlenden Werte (ihr Beitrag wäre auf Grund der tiefen Temperaturen und des kleinen Abfluss nur gering), mit 70 TWh am grössten (bei einer Referenztemperatur von 0°C). In den Jahren 1982 bis 2002 betrug der mittlere Energieeintrag in den Genfersee 55 TWh (44 bis 64 TWh), 1886 betrug der Energieeintrag auf Grund der kleinen Wassermenge nur 44 TWh. Der abgeschätzte Energieeintrag für die Jahre vor dem Kraftwerksbau (1916-1934) beträgt 61 TWh. Zum Vergleich: Die Walliser Wasserkraftwerke produzieren im Jahr durchschnittlich 11 TWh elektrische Energie. Diese Energie würde im natürlichen Zustand ohne Wasserkraftwerke das Wasser der Rhone erwärmen.

5.2 FLUSSMORPHOLOGIE / KANALISIERUNG

5.2.1 Kanalisation

Die Kanalisation führt gegenüber der unkorrigierten natürlichen Situation zu einer kleineren Wasseroberfläche der Rhone und zu einer kleineren Aufenthaltszeit. Die Verringerung der Wasseroberfläche ist in der Abbildung 27 aus einem Ausschnitt der Dufourkarte von 1850 mit natürlichem und dem heutigen korrigierten Wasserlauf ersichtlich. Das Wasser, welches schneller abfließt und dadurch kürzer exponiert ist, wird gegenüber der natürlichen Situation durch die kleinere Wasseroberfläche weniger durch Energieaustausch über die Wasseroberfläche beeinflusst. Das durch die Wasserkraftnutzung ohnehin kältere Wasser erwärmt sich im Sommer weniger, bevor es in den Genfersee gelangt. Im Winter kühlt es weniger stark aus. Durch die Vereinheitlichung der Abflussverhältnisse gegenüber der natürlichen Situation mit vielen Seitenarmen und Stillwasserzonen gibt es viel kleinere Temperaturvariationen über den Flussquerschnitt (vgl. Messungen im Tagliamento im Kapitel 4.7). Durch die fehlende Anbindung von Seitengewässern sind den Fischen Rückzugsmöglichkeiten verwehrt. Der Austausch mit dem Grundwasser wird durch eine Kanalisation gegenüber der natürlichen Situation verringert. Die Beschattung durch Bepflanzung der Uferpartien und die Änderung der Neigung der Uferböschung durch die Kanaldämme kann in kleineren Seitenbächen ebenfalls einen Einfluss haben.



Abbildung 27: Ausschnitt aus der Dufour-Karte von 1850. Darüber ist der heutige kanalisierte Rhoneverlauf zwischen Kilometer 50 und 60 eingezeichnet (aus Département fédéral de l'intérieur, 1964, *La correction du Rhône en amont du lac Léman*, Publication du Service fédéral des routes et des digues, Bern).

5.3 WASSERKRAFTWERKE

5.3.1 Wasserentnahme und Restwasserstrecken

In der Abbildung 28 sind die Restwasserstrecken im Wallis aufgetragen. Praktisch alle grösseren Bäche weisen Restwasserstrecken auf. Die Situation ist sehr komplex, da es an einem Bach mehrere Kraftwerke geben kann, und Überleitungen von einem Einzugsgebiet ins nächste vorkommen.

Wasserfassungen haben keinen grossen direkten Einfluss auf die Wassertemperatur, da das Wasser direkt ober- und unterhalb des Fassungsbauwerks in etwa die gleiche Temperatur aufweist. Dies gilt natürlich nicht, falls die gesamte Wassermenge gefasst wird und somit die Wassertemperatur gar nicht mehr definiert ist. Auf den Energiehaushalt des Gewässers haben Wasserfassungen jedoch einen deutlichen Einfluss, da mit dem entnommenen Wasser auch ihre Wärmeenergie entnommen und erst an einer anderen Stelle wieder eingeleitet wird.

Durch die Wasserentnahme wird auf der Restwasserstrecke der Abfluss verringert. Dies hat zur Folge, dass die Wasseroberfläche und die Fliessgeschwindigkeit ebenfalls verringert werden. Aufgrund der kleineren Oberfläche ist der Energieaustausch des Wassers mit der Atmosphäre und dem Sediment gegenüber der unbeeinflussten Situation vermindert. Da die Wassermenge wegen der Gerinneform bei einer Wasserentnahme aber proportional stärker kleiner wird als die Wasseroberfläche, nimmt die geringere vorhandene Wassermenge z.B. im Sommer pro Volumeneinheit mehr Energie aus der Atmosphäre und dem Sediment auf. Durch die tiefere Fliessgeschwindigkeit ist das Wasser auf der Strecke länger exponiert. Aus diesen beiden Gründen wird das Wasser auf den Restwasserstrecken im Sommer normalerweise stärker erwärmt und im Winter stärker abgekühlt.

Zuflüsse in der Restwasserstrecke haben einen grösseren Effekt auf die Mischtemperatur. Bei Flüssen mit einer Restwassermenge gleich Null kann der Temperaturcharakter durch seitliche Zuflüsse total verändert werden.

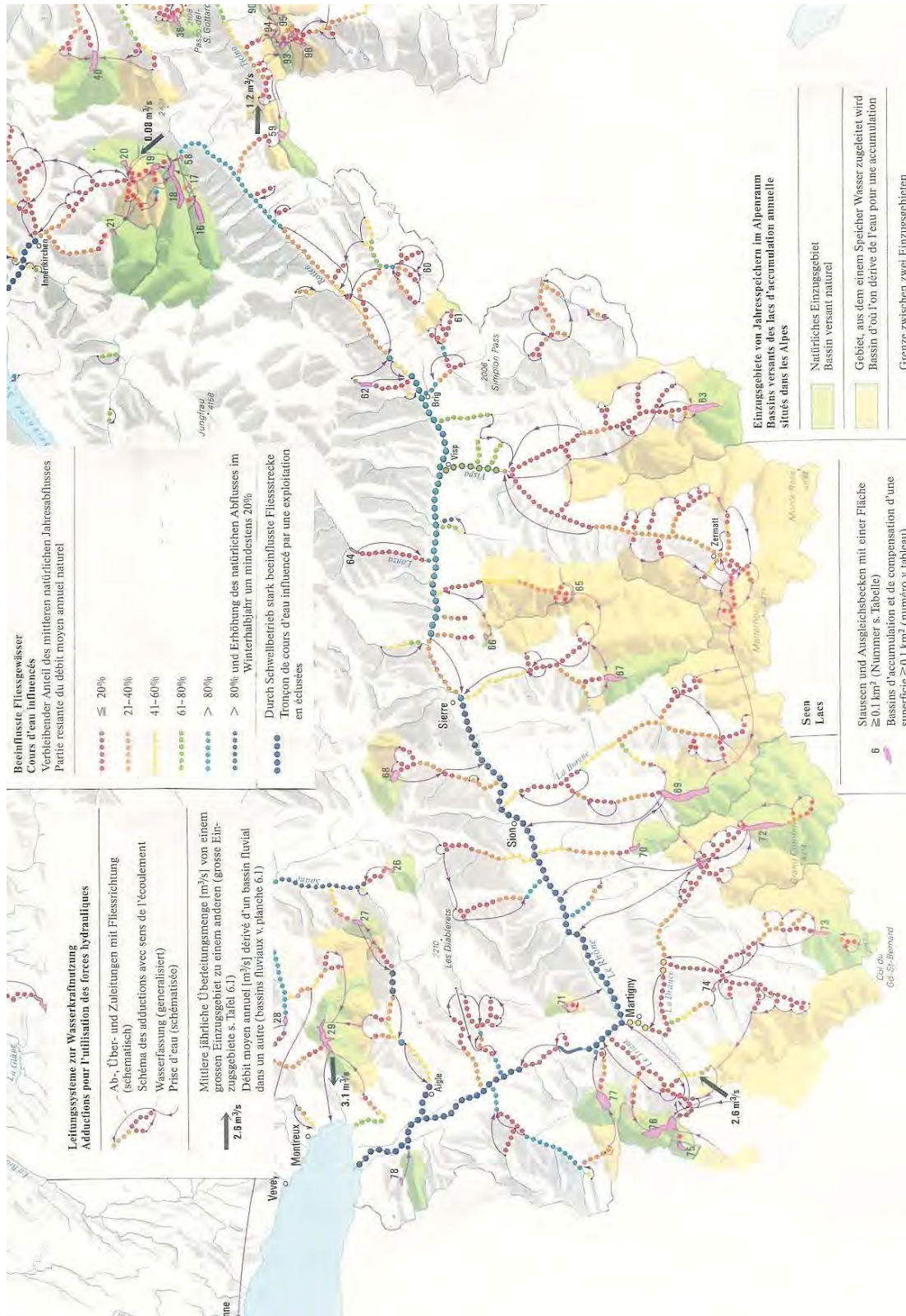


Abbildung 28: Ausschnitt aus der Karte über die Beeinflussung der Flie遝gewässer durch Kraftwerke im Kanton Wallis aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz (BWG 2001).

Bei der Lonza wurde exemplarisch die hypothetische natürliche Erwärmung im Bachbett modelliert (Frey 2003). Das Wasser der Lonza erwärmt sich auf der rund 7.5 km langen Restwasserstrecke gemäss dem Modell im Sommer um bis 3.1°C zusätzlich gegenüber einer hypothetischen Situation ohne Wasserkraftwerk. Durch die Rückleitung des turbinieren Wassers kehren sich die Temperaturverhältnisse unterhalb des Kraftwerks um. Das Lonzawasser ist unterhalb der Rückleitung im hydroelektrisch genutzten Fluss um 1.2 bis 1.4°C kühler gegenüber der hypothetischen unbeeinflussten Situation¹⁰. Die Gründe für den Energieverlust von 55 MW bei einem Abfluss von 10 m³/s liegen gemäss Frey zu 82% in der fehlenden Erwärmung durch Reibungswärme (wegen der Umwandlung der potentiellen Energie in elektrischen Strom) und zu 18% in der Verkleinerung der Wasseroberfläche bei einem verringerten Abfluss.

Unter der groben Annahme, dass dieses Verhältnis von 9:2 (Verringerung der Reibungswärme durch Wasserkraftnutzung zu Verkleinerung des Energieeintrags auf Restwasserstrecken) auch bei den anderen hydroelektrisch genutzten Zuflüssen der Rhone zutrifft, ergibt sich gemäss Frey (2003) zur Temperaturreduktion durch die Stromproduktion von 1.6°C eine zusätzliche Temperaturreduktion durch die verringerte Wasseroberfläche auf den Restwasserstrecken von 0.4°C im Sommer. Im Winter kann mit rund 10mal kleineren Energieflüssen gerechnet werden¹¹. Da bei den anderen Zuflüssen aber ganz andere Bedingungen herrschen und es zeitliche Variationen bei den Wetter- und Abflussverhältnissen geben kann, sind dies nur sehr grobe Abschätzungen.

Auf die Rhone haben diese Veränderungen beim erwärmten oder abgekühlten Restwasser in den seitlichen Zuflussstrecken keinen grossen Einfluss, da mengenmässig das meiste Wasser gespeichert und turbiniert wird. Aus diesem Grund ist in der Rhone der Einfluss durch die Speicherung des Wassers in Stauseen und durch den Schwall/Sunk-Betrieb dominierend.

5.3.2 Speicherung

Im Gegensatz zu den Laufkraftwerken, bei denen das entnommene Wasser sofort turbiniert und direkt unterhalb des Damms wieder in den Fluss geleitet wird und die deshalb keinen grossen Einfluss auf die Wassertemperatur haben, wird das Wasser in Speicherkraftwerken über längere Zeit (1 Tag bis 1 Jahr) gespeichert. Wegen des grösseren Bedarfs an elektrischem Strom im Winter wird Wasser aus dem Sommerhalbjahr in den Stauseen gespeichert und erst im Winterhalbjahr turbiniert. In der Rhone sind dies etwa 1000 Mio m³ (siehe Abschätzung im Kapitel 4.3). Die Abflüsse der Rhone sind deshalb im Sommer gegenüber der natürlichen Situation erniedrigt und im Winter erhöht. Die Energie, welche durch die Stauseen maximal gespeichert werden kann, beträgt damit 5.8 TWh (unter der Annahme,

¹⁰ Bei einer ähnlichen Modellstudie im Bleniotal (Meier 2002) im Tessin erwärmte sich das Wasser des Brennos auf der rund 20 km langen Restwasserstrecke bis zur Mündung in den Ticino im Sommer um bis zu 3.7 (±0.9)°C bei der hydroelektrisch genutzten Situation gegenüber einer hypothetischen Situation ohne Wasserkraftwerke.

¹¹ Winterverhältnisse konnten in der Studie von Frey (2003) nicht untersucht werden. Bei der Studie im Bleniotal (Meier 2002) ist der Gesamtenergiefluss mit 211 Wm⁻² im Sommer rund 10 mal grösser als im Winter mit 24 Wm⁻².

dass die Wassertemperatur in den Stauseen gemäss der Abbildung 11 im Mittel 5°C beträgt und bei einer Referenztemperatur von 0°C). Dies entspricht rund einem Zehntel der von der Rhone durchschnittlich in den Genfersee transportierten Wärmeenergie (55 TWh).

Die Stauseen vergrössern die Wasseroberfläche im Einzugsgebiet. Bei der Rhone sind es etwa 14 km² (EAWAG 2002). Durch diese grosse Wasseroberfläche wird eine bedeutende Wärmeenergie in die Stauseen eingetragen und das Wasser wird erwärmt. Mit dem Ausgleichskoeffizienten von Kuhn (1977) kann dieser Eintrag grob abgeschätzt werden. Für Seen auf rund 2300 m.ü.M. wie den Grande Dixence beträgt der Austauschkoefizient im Juli ca. 32 Wm⁻²K⁻¹. Die Wassertemperatur liegt rund 4°C¹² über der Gleichgewichtstemperatur dieser Höhenlage. Damit ergibt sich eine Energiemenge von rund 7.9 TWh für das Sommerhalbjahr. Für den Winter wird angenommen, dass durch die Eisbedeckung kein Energieaustausch stattfindet.

Temperaturmessungen in drei sehr tiefen Reservoirs im Wallis mit einem gesamten Volumen von 840 Mio. m³ (entspricht 62% des gesamten Stauvolumens im Einzugsgebiet der Rhone) zeigen, dass das gespeicherte Wasser wegen der grossen Trübung und der hohen Lage nur geringe absolute Wärmemengen aufnimmt. Wegen der grossen Trübung wird das Reservoirwasser teilweise nur in den obersten Zentimetern erwärmt (Abbildung 9). In diesen hohen Lagen kühlt die oberste erwärmte Schicht nachts wieder aus, da sie wegen der Trübung sehr geringmächtig ist. Im relativ langem Winter isoliert eine Eisschicht das darunter liegende Wasser. Die Wassertemperatur ändert sich trotz grosser Oberfläche der Stauseen nicht stark. Dadurch hat das Wasser in vielen Stauseen praktisch über das ganze vertikale Profil tiefe Wassertemperaturen zwischen 4 und 6.5°C. Das turbinierete Wasser stammt in der Schweiz bei Stauseen normalerweise aus den untersten Schichten. Im Frühling, wenn der Stausee fast leer ist und kaltes Oberflächenwasser entnommen wird, kann die Temperatur bis 3°C absinken. Da das Wasser in den Stollen und Turbinen¹³ praktisch nicht durch Reibung erwärmt wird, ist es bei der Einleitung in der Rhone zwischen 3 bis 6.5°C kalt (Abbildung 11). Die Rhone erhält von den Kraftwerken also relativ kaltes Wasser, welches aus vorhergehenden Jahreszeiten gespeichert und nur wenig von der Atmosphäre beeinflusst wurde.

In der Rhone wird das kältere Wasser aus den Stauseen v.a. im Sommer stärker erwärmt, da es mehr von der Gleichgewichtstemperatur abweicht. Da dieser Ausgleich jedoch langsam abläuft (vgl. Anhang 9.4) und die Wasseroberfläche als wichtige Einflussgrösse durch die Kanalisierung verringert wurde, kann der Einfluss der Wasserkraftwerke vermutlich nur zu einem geringen Teil kompensiert werden.

¹² Beim Stausee Grande Dixence, dem grössten im Wallis, wurden am 26.6.2003 an der Wasseroberfläche (auf 2306 m.ü.M.) 8.5°C gemessen. Dieser Temperaturwert liegt rund 4 °C unterhalb der Gleichgewichtstemperatur von 12.5°C bei Seen auf 2300 Meter Höhe.

¹³ In der Turbine des Wasserkraftwerks wird das Wasser nur um 15 bis 20% (Wärme)Energieverlust (bei einem Wirkungsgrad von 80 bis 85%) erwärmt. Im natürlichen Fall würde das Wasser durch die Reibung im Gerinne um 100 % erwärmt.

5.3.3 Turbinierung

Bei der Turbinierung wird die potentielle Energie (Lageenergie) des Wassers in elektrische Energie umgewandelt. In der natürlichen Situation ohne Wasserkraftwerk würde die potentielle Energie zuerst in kinetische Energie und durch die Reibung im Wasserkörper und am Gewässergrund in Wärmeenergie umgewandelt. Der Zusammenhang zwischen Kraftwerksleistung und Temperaturerhöhung ist durch die Formel 6 gegeben. Da Wasserkraftwerke einen Wirkungsgrad zwischen 80% und 85% aufweisen, werden ca. 15 bis 20% der Energie im Kraftwerk durch Reibungsverluste in Wärme umgewandelt, welche fast vollständig vom turbinieren Wasser aufgenommen wird. Die Pumpspeicherung und die damit verbundene Erwärmung des gepumpten Wassers spielt bei der Rhone keine grosse Rolle.

Aus der gesamten jährlichen Energieproduktion der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet der Rhone (11 TWh) kann mit Hilfe des Jahresabflusses (5.8 Mia. m³) und der Formel 6 die fehlende Erwärmung der Rhone berechnet werden: 1.6°C. Der entsprechende Wert für Martigny (Branson) beträgt ebenfalls 1.6°C. Zum Vergleich werden in der Tabelle 25 entsprechende hypothetische Temperaturdifferenzen aus anderen hydroelektrisch genutzten Flüssen der Schweiz aufgeführt. Da natürlicherweise das meiste Wasser im Sommerhalbjahr abfließt, ist auch der Energieverlust durch die Turbinierung gegenüber der natürlichen Situation ohne Wasserkraftwerke im Sommer grösser. Der natürliche Abfluss der Rhone in Porte du Scex, zu dem die theoretisch aufgenommene Reibungswärme ja proportional wäre, ist im Sommer 4mal grösser als im Winter. Aus diesem Grund verteilt sich der hypothetische Energieverlust mit Wasserkraftwerken relativ zur natürlichen Situation ohne Turbinierung auf 8.8 TWh im Sommer und 2.2 TWh im Winter.

Tabelle 25: Mittlere Abflusswerte für die Jahre 1935-2002 (BWG 2002) sowie mittlere Leistungen der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet und daraus resultierende hypothetische Temperaturreduktion verschiedener hydroelektrisch genutzter Flüsse der Schweiz

Fluss	Mittlerer Abfluss [m ³ /s]	Mittlere Leistung der Kraftwerke [MW]	Temperaturreduktion [°C]
Rhein, Schmitter	240	1114	1.1
Aare, Brienzwiler	35.0	527	1.2
Ticino, Bellinzona	69.0	493	1.7
Rhone, Porte du Scex	183	1255	1.6
Rhone, Branson (ganzes Jahr)	133	880	1.6
Rhone, Branson (Winter)	75	840	2.7
Rhone, Branson (Sommer)	191	924	1.2

5.3.4 Schwall/Sunk:

Die Produktion von Spitzenstrom führt zu Schwall/Sunk-Situationen in den Flussstrecken unterhalb der Wasserkraftwerke. Vor allem im Sommer kann die Wassertemperatur kurzfristig stark ändern.

Da das turbinierete Wasser aus der Tiefe der Stauseen stammt und über das ganze Jahr kalt ist (Abbildung 11), gibt es nach der Wasserrückgabe eine Abkühlung. Im Winter, wenn die Temperatur der Rhone unter 4°C fällt, kann das Rhonewasser durch das turbinierete Wasser erwärmt werden. Während der Zeit, während der das Rhonewasser die gleiche Temperatur wie das turbinierete Wasser aufweist, ergibt sich durch Schwall/Sunk keine Temperaturänderung (aber natürlich eine Änderung beim Abfluss). Die Wassertemperatur liegt bei Porte du Scex während rund 100 Tagen im Jahr zwischen 4 und 6°C (BWG 2002). Gemäss Abbildung 11 ist dies v.a. in den Monaten November bis Februar der Fall. Falls sich die Wassertemperatur jedoch 0°C annähert, wird es durch eine Einleitung von turbiniereten Wasser erwärmt (Abbildung 2). Im Sommer wird das Rhonewasser durch die Einleitung deutlich abgekühlt (Abbildung 8). In der Rhone werden die Temperaturunterschiede durch den Austausch mit der Atmosphäre langsam wieder ausgeglichen (vgl. Anhang 9.4).

Tabelle 26: Maximale Temperaturgradienten in der Rhone mit Datum und wahrscheinlichem Grund.

Messstelle	Max. Temperaturänderung innerhalb 1 Stunde	Datum	Wahrscheinlicher Grund
Rhone Gampel R	2.3°C	18.3.2002	Sunk
Rhone Gampel R	-2.2°C	22.9.2002	Schwall
Rhone Sierre L	1.7°C	18.10.2002	Sunk
Rhone Sierre L	-2.2°C	4.10.2002	Schwall
Rhone Granges L	1.8°C	20.4.2002	Sunk
Rhone Granges L	-1.4°C	9.3.2003	Schwall
Rhone Sion L	1.0°C	21.3.2002	Sunk
Rhone Sion R	-1.0°C	26.9.2002	Schwall
Rhone Sion L	-0.8°C	7.7.2003	natürliche Abkühlung?
Rhone Nendaz L	1.5°C	12.4.2003	Sunk
Rhone Nendaz L	-1.0°C	2.10.2002	Schwall
Rhone Fully L	1.6°C	16.4.2003	Sunk
Rhone Fully L	-2.4°C	24.9.2001	Schwall
Vispa Visp	3.7°C	5.11.2001	Sunk?

In der Tabelle 26 sind die grössten gemessenen Temperaturgradienten bei der Rhone innerhalb einer Stunde zusammengefasst. Die Interpretation der Gründe war nicht immer sehr einfach. Verschiedene Effekte, wie z.B. Trockenfallen der Messsonde, Trockenlegung der Sonde durch Passanten oder Fehlfunktion der Sonde, können zu einer kurzfristigen Temperaturänderung führen. Bei der Auswertung wurde versucht, solche Gründe auszuschliessen.

Interessanterweise treten die grössten Temperaturänderungen nicht im Sommer mit hohen Rhonetemperaturen und tiefen Reservoirtemperaturen auf. Die Abflussmengen sind wegen der Schneeschmelze gross und das kalte Wasser wird stark verdünnt. Die grössten Temperaturänderungen ergeben sich im März/April und September/Oktober, wenn die Abflussmengen der Rhone klein (Abbildung 14) und das Wasser in den Reservoiren kalt ist (Abbildung 11). Im Winter sind die Abflussmengen zwar auch klein, aber die Temperaturunterschiede des Rhone- und des turbinierten Wassers sind nicht sehr gross. Die grössten Temperaturabsenkungen in der Rhone werden immer durch einen Schwall, d.h. Einleiten von kaltem Wasser nach Anfahren der Turbinen ausgelöst, während die grössten Temperaturzunahmen durch Sunk, das Abschalten der Turbinen und Nachfliessen von relativ warmen Wasser, verursacht wird. Durch natürliche meteorologische Einflüsse ausgelöste Erwärmungen und Auskühlungen des Wassers sind deutlich kleiner als 1°C pro Stunde.

5.4 KLIMAÄNDERUNG

Die Wassertemperaturen werden neben dem Einfluss der alpinen Speicherkraftwerke und Kühlwassereinleitungen auch durch die Klimaänderung beeinflusst (Jakob et al. 1996). Hari und Güttinger (2004) haben die Abfluss- und Temperaturmessungen bei den drei NADUF-Stationen im Wallis (Lonza-Blatten, Rhone-Sion, Rhone-Porte du Scex) ab 1981 untersucht. Bei den Auswertungen zeigt sich, dass die Wassertemperatur in den letzten 20 Jahren leicht zunimmt, bei Porte du Scex um 0.8°C. Im Sommer- und Winterhalbjahr ist der Wert gleich gross. Die beiden Parameter Abfluss und Wassertemperatur (12 Monate-Sinus-Mittelwert) korrelieren: Je höher der Abfluss, desto tiefer die Temperatur. (-0.22°C pro 1 m³/s bei der Lonza, -0.86 bzw. -0.76 °C pro 100 m³/s bei der Rhone in Porte du Scex bzw. Sion, Signifikanzniveau von 99%).

Tabelle 27: Mittelwerte von Temperaturen und Abfluss der drei NADUF-Stationen an der Rhone und der Lonza (Daten von Hari & Güttinger,2004).

Daten aus Hari & Güttinger (2004)	Lonza-Blatten	Rhone-Sion	Rhone-Porte du Scex
Tagesmittel der Wassertemp. (arithm. 20J.-MW)	3.73°C	6.86°C	7.12 °C
Abflussmittel (arithm. 20J.-MW)	4.92 m ³ /s	108 m ³ /s	192 m ³ /s
Datum der Sinus-Jahresmaxima	22.7. (Bereich: 8.7. bis 12.8.)	8.7. (Bereich: 27.6. bis 17.7.)	13.7. (Bereich: 8.7. bis 24.7.)
Tagesmittel Amplituden	2.14°C	2.58°C	2.91 °C

Die Einflüsse der Klimaänderung auf den Wärmehaushalt sind sehr schwierig abzuschätzen, da nicht völlig klar ist, wie das Klima durch eine erhöhte Konzentration an Treibhausgasen verändert wird.

Die Wärmeabstrahlung, welche bei einer anthropogenen Wassertemperaturerhöhung neben der Wärmeleitung und der Verdunstung hauptsächlich für den zusätzlichen Wärmeverlust verantwortlich ist, nimmt gemäss einer Abschätzung in Meier (1996) bei einer Erhöhung der Wassertemperatur um 1.5°C um 7 Wm^{-2} zu (entspricht nur rund 2 % der gesamten Abstrahlung von 385 Wm^{-2})¹⁴.

Bei einer nicht korrigierten Rhone würde sich die Klimaänderung stärker auf die Wassertemperatur auswirken, da die Wasseroberfläche und damit auch der Energieaustausch vergrössert wären.

5.5 WEITERE ANTHROPOGENE EINFLÜSSE

5.5.1 Wasserentnahme für Landwirtschaft oder andere Zwecke

Die Wasserentnahme für landwirtschaftliche Zwecke hat im Gegensatz zu den Einleitungen keinen direkten Einfluss auf die Wassertemperatur. Durch die Verminderung der Wassermenge sind ähnliche indirekte Effekte wie auf der Restwasserstrecke zu erwarten. Da auch Grundwasser für Bewässerungszwecke eingesetzt wird, könnte vermehrt gepumptes Grundwasser in die Rhone abfliessen und die Wassertemperatur leicht in die Richtung der Grundwassertemperatur verschieben.

5.5.2 Temperierte Zuflüsse

Ausser den Kläranlagen und kleineren industriellen Betrieben gibt es keine grösseren Einleiter von künstlich erwärmtem oder abgekühltem Wasser.

Natürlich erwärmte Zuflüsse können bei den Restwasserstrecken in den Seitenflüssen oder in der Pfywaldstrecke mit minimalem Abfluss den Temperaturhaushalt verändern. Bei der Borgne fliesst zum Beispiel bei Cambioulle warmes Wasser aus dem Berg (rund 20 l/s). Dieses Wasser mit einer Temperatur von 25°C erwärmte an den Messtagen im Oktober 2002 die Restwassermenge der Borgne um mehr als 3°C (Frey 2003).

¹⁴ Annahmen für Abschätzung: Wassertemperatur von 16°C , vgl. auch Abschätzungen in Anhang 9.4

5.6 ZUSAMMENFASSUNG:

ENERGIEBILANZ VOR UND NACH DEM KRAFTWERKSBAU

Tabelle 28: Einfache Energiebilanzen der Rhone bei Porte du Scex.

Energiebilanzen (Referenztemperatur 0°C)	Jährliche Energie menge (TWh)	Sommer- halbjahr (TWh)	Winter- halbjahr (TWh)
Abgeschätzte Wärmeenergie der Rhone aus mittleren Abflussmengen der Jahre 1916 bis 1934 und Temperaturen des Winterhalbjahrs 1886 und des Sommerhalbjahrs 1904	53.4	48	5.4
Mittlere Wärmeenergie der Rhone in den Jahren 1982 bis 2002	55 (44 – 64)	42	13
Differenz (Schätzwert 1916 - 1934 minus Mittelwert 1982 - 2002)	-1.6	6	-7.6
Energieverlust durch Verkleinerung der Wasseroberfläche auf Restwasserstrecken (Abschätzung/Modellrechnung)	2.4	2.2	0.2
Mittlerer Energieverlust der Rhone durch Turbinierung (Energieerhaltung: Umwandlung potentieller Energie in elektrischen Strom)	11.0	8.8	2.2
Energieaufnahme durch die vergrösserte Wasseroberfläche der Reservoirs (Abschätzung mit Oberfläche und Ausgleichskoeffizient von Kuhn, 1977)	-7.9	-7.9	0
Maximale Speicherung von Wärmeenergie durch Stauseen (Abschätzung mit Reservoirvolumen)	0.0	5.8	-5.8
Korrektur aufgrund mittlerer Erwärmung der Rhone um 0.8°C in den letzten 20 Jahren (Hari & Güttinger 2004)	-4.6	-3.0	-1.6
Summe von Energiegewinn durch Vergrösserung der Reservoirfläche und -verlust durch Restwasser, Turbinierung und Speicherung inkl. Klimaänderung	0.9	5.9	-5

Für den Vergleich werden die Energiebeiträge der verschiedenen Quellen in der Tabelle 28 zusammengefasst. Dazu wurden die im Kapitel 5 hergeleiteten einfachen Abschätzungen verwendet, welche mit Ausnahme der Energieumwandlung

in den Kraftwerken nicht exakt stimmen, sondern jeweils nur die Grössenordnung angeben. Für die Bestimmung der Energiebilanz vor dem Bau der Wasserkraftwerke werden die Abflussmengen der Periode 1916 bis 1934 und die Wassertemperaturen aus dem Winterhalbjahr 1886 und dem Sommerhalbjahr 1904 verwendet.

Die abgeschätzte mittlere jährliche Wärmeenergie der Rhone in Porte du Scex vor dem Bau der Wasserkraftwerke war ähnlich gross wie diejenige von 1982 bis 2002 mit 55 TWh (Bereich von 44 bis 64 TWh). Bei den Jahreszeiten ergeben sich aber Unterschiede: Im Sommerhalbjahr war die Energiebilanz mit 6 TWh grösser, während heute im Winter im Mittel rund 8 TWh mehr Wärmeenergie in den Genfersee eingetragen wird als vor dem Kraftwerksbau.

Der Unterschied im Winter ist zu einem grossen Teil auf die Speicherung des Wassers in den Reservoirien zurückzuführen. Wird angenommen, dass sich die Stauseen während des Sommers füllen und im Herbst eine Temperatur von 5°C aufweisen, beinhalten sie eine Energiemenge von rund 6 TWh, welche im Winterhalbjahr wiederum an die Rhone abgegeben wird (unter der Annahme, dass das Wasser 5°C warm bleibt).

Der zusätzliche Unterschied im Sommer von 6 TWh kann hauptsächlich durch die Umwandlung der potentiellen Energie in elektrische Energie statt in Wärmeenergie und die zusätzliche Aufnahme von Energie aufgrund der grösseren Oberfläche der Stauseen erklärt werden. Durch die Wasserentnahme werden auf den Restwasserstrecken die Wasseroberfläche verkleinert und v.a im Sommer rund 2 TWh weniger Energie aus der Atmosphäre aufgenommen. In den letzten 20 Jahren hat die Wassertemperatur der Rhone um rund 0.8°C zugenommen (Hari & Güttinger 2004). Beim Vergleich der Zeitperioden vor und nach dem Kraftwerksbau muss also auch ein Korrekturfaktor für die Klimaänderung berücksichtigt werden. Auf den Sommer entfallen 3 TWh und auf den Winter 1.6 TWh. Über Effekte der Klimaänderung auf die Wassertemperatur der Rhone vor dem Jahr 1970 ist aufgrund fehlender Messungen nichts bekannt. Im Vergleich zu den letzten 20 Jahren sind diese Effekte aber klein (Hari & Güttinger 2004).

Die Differenzen in der Energiebilanz zwischen den Jahren vor dem Bau der Wasserkraftwerke und der Periode 1982 bis 2002 können gut erklärt werden. Es muss aber noch einmal betont werden, dass die Zahlen aufgrund der groben Abschätzungen nur als Grössenordnung verstanden werden dürfen. Die Werte sind mit grossen Unsicherheiten behaftet. Der durch die Temperaturveränderungen ausgelöste zusätzliche Energieaustausch mit der Atmosphäre wurde nicht quantifiziert.

6 VERBESSERUNGSMASSNAHMEN

6.1 AUSWIRKUNGEN VON TEMPERATURÄNDERUNGEN AUF GEWÄSSER-ORGANISMEN

Fliessgewässerorganismen haben verschiedene Ansprüche an die Wassertemperatur. Fische sind wechselwarm, d.h. ihre Körpertemperatur entspricht praktisch der Wassertemperatur. Dadurch sind sie Temperaturänderungen direkt ausgesetzt. Körperfunktionen wie z.B. Nahrungsaufnahme oder Verdauung laufen je nach Wassertemperatur schneller oder langsamer oder bei Überschreitung gewisser Grenzwerte gar nicht ab (Abbildung 29 aus Elliot 1981). Die Temperatur des umgebenden Wassers ist sogar wichtiger als die Futtermverfügbarkeit (Beitinger et al. 2000).

Extrem hohe oder tiefe Wassertemperaturen können auch tödlich wirken. Kurzfristige Temperaturveränderungen werden eher ausgehalten als extreme Temperaturen über längere Zeit. Falls es Zonen mit besser geeigneter Wassertemperatur gibt, können sich die Tiere aktiv in diese Zonen zurückziehen (Moss 1970). Rasche Temperaturerhöhungen werden dabei grundsätzlich besser ertragen als kurzfristige Temperaturerniedrigungen, da im zweiten Fall der Stoffwechsel herabgesetzt wird und die Fische weniger schnell reagieren (Beitinger et al. 2000). Zudem wird die Toleranz gegenüber höheren Temperaturen schneller erworben und sie ist beständiger als die Toleranz gegenüber tiefen Werten.

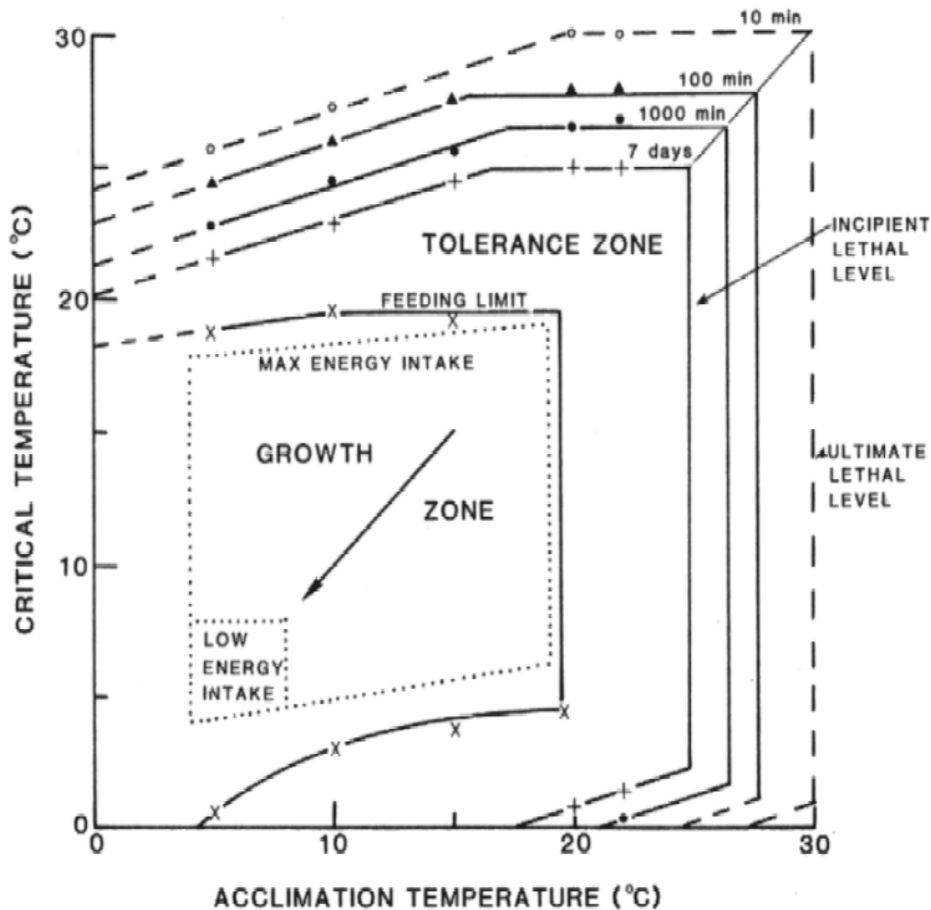


Abbildung 29: Temperaturpräferenzen der Forelle (Elliot 1981)

Der zeitliche Verlauf der Wassertemperatur wirkt ausserdem als Zeitgeber bei der Entwicklung der Tiere, z.B. für das Schlüpfen der Eier. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Temperatursummen, also die Summe der mittleren Tagestemperaturen seit Jahresbeginn. Aber auch das Ausmass und der Zeitpunkt von Temperaturänderungen („thermal cues“) wirkt bei gewissen Tierarten als Auslöser für Entwicklungsschritte. Bei chaotischen Temperaturänderungen, wie bei Schwall/Sunk-Effekten, kann so eine Art zu früh ausschlüpfen und erfriert aufgrund der kalten Umgebungstemperatur. Teilweise wirken die Temperaturänderungen erst, wenn andere Bedingungen wie z.B. die Abflussmengen oder Lichtintensität auch erfüllt sind. Durch den menschlichen Einfluss kann es vorkommen, dass die Wassertemperatur die Bedingungen für einen nötigen Entwicklungsschritt nie erfüllt.

Bei einer Laboruntersuchung zur Unterstandsnutzung bei Schwall/Sunk-Betrieb wurde festgestellt, dass bei tiefen Wassertemperaturen der Anteil der durch den Schwall abgeschwemmten jungen Bachforellen grösser ist, da das Schwimmvermögen durch die tiefe Temperatur zusätzlich reduziert ist (Vehanen et al. 2000). Hydraulische Schwall/Sunk-Effekte können so durch kaltes turbiniertes Wasser verstärkt werden.

Temperaturschwankungen führen durch die erhöhte Aktivität zu einem höheren Stoffwechsel und damit zu einem grösseren Sauerstoffverbrauch (Lyytikäinen &

Jobling 1998). In einem Laborexperiment zum Einfluss kleiner Temperaturschwankungen auf den Metabolismus von *Salvelinus alpinus* wurde festgestellt, dass Tiere unter ständig wechselnden Temperaturverhältnissen in der Grössenordnung von 1°C einen höheren Sauerstoffverbrauch aufweisen als ihre bei konstanter Temperatur gehaltenen Artgenossen.

Diese Effekte haben häufig eine Artenverschiebung zugunsten von Tierarten zur Folge (Ubiquisten), welche an ihre Umgebung keine hohen Ansprüche stellen und auch mit extremen Bedingungen leben können.

Neben der Wassertemperatur spielen auch andere Einflüsse eine wichtige Rolle. Bei Schwall/Sunk ist der hydraulische Stress der wichtigste Einflussfaktor (LeRoy et al. 1997).

6.2 GRÖSSTE DEFIZITE BEIM TEMPERATURREGIME DER RHONE

Bei der Rhone sind durch die Erhöhung der gemittelten Temperatur im Winter bzw. die Erniedrigung der gemittelten Temperatur im Sommer aufgrund des Kraftwerksbetriebs nur geringe ökologische Auswirkungen zu erwarten, da die Temperaturänderung klein ist im Vergleich zum Akklimatisations- und Präferenzbereich der natürlicherweise vorkommenden Organismen (siehe Abb. 25 als Beispiel). Ausserdem liegt die Temperaturerniedrigung im Sommer im Bereich der jährlichen Schwankungen. Bedeutender sind Schwall/Sunk-Effekte zu werten, welche zu kurzfristigen Temperaturschwankungen führen. Hier sind aber vermutlich die damit zusammenhängenden Effekte durch die Veränderungen der Abflussmengen (Schwankungen der Wasseroberfläche, hydraulischer Stress) wichtiger für die Fliessgewässerorganismen.

Den grössten Einfluss auf die Lebensgemeinschaften der Rhone hat die Eintönigkeit der Wassertemperatur, verursacht durch die Kanalisierung der Rhone. Die Tiere können wegen der unterbrochenen Durchgängigkeit nicht in Zonen (Stillwasser, Totarme) gelangen, deren Wassertemperatur ihnen eher entspricht. Rückzugsmöglichkeiten in wärmere Zonen im Sommer für wärmeliebende Tiere fehlen genauso wie Zugangsmöglichkeiten zu Zonen unterschiedlicher Temperatur im Winter. Temperaturvariationen in Quer- und Längsrichtung des Flusses sind äusserst wichtig, damit im gleichen Flusssystem verschiedene Tierarten mit unterschiedlichen Ansprüchen an die Temperatur nebeneinander leben können. Nur so könnte sich eine Artenvielfalt einstellen, die in der Rhone verloren gegangen ist.

6.3 VERBESSERUNGSMASSNAHMEN

Im Folgenden werden Lebensraumverbesserungen im Hinblick auf ihre Effekte auf das Temperaturregime diskutiert. Zuerst wird jeweils das mit der Massnahme verbundene Ziel erwähnt und anschliessend die Wirkung auf die Wassertemperatur diskutiert.

6.3.1 Lebensraumverbesserungen:

Aufweitungen

Ziel: Aufweitungen sind eine weit verbreitete Massnahme zur Verbesserung des Lebensraumes, bei der dem Fluss wieder eine grössere Fläche zur Verfügung gestellt wird. Aufweitungen haben positive Effekte auf die Lebensgemeinschaften, da sie den Lebensraum vergrössern und unterschiedliche (hydrologische und thermische) Lebensbedingungen schaffen und ihn mit dem Umland besser vernetzen.

Wirkung auf Wassertemperatur

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Effekte der Aufweitungen an der Thur auf die Wassertemperatur mit Modellstudien untersucht (Frey et al. 2003b). Durch Aufweitungen wird die Wassertemperatur in Richtung der natürlichen Gleichgewichtstemperatur verändert, da die Wasseroberfläche vergrössert wird und dadurch auch der Energieaustausch mit der Atmosphäre zunimmt.

Falls sich mehrere Seitenarme und unterschiedlich tiefe Bereiche (Flachwasserzonen) mit verschiedener Aufenthaltsdauer der Wassermassen ausbilden, kann durch eine Aufweitung die Temperaturvariation quer und längs zum Fluss vergrössert werden. Dies ist ein weiterer positiver Effekt, da eine grössere Temperaturvariabilität auch eine grössere Artenvielfalt zur Folge hat. Im Tagliamento wurden Temperaturunterschiede bis zu 15°C zwischen verschiedenen Stellen im Flussquerschnitt gemessen (Arscott et al. 2001).

Einzelne, kleine Aufweitungen mit einer Länge von wenigen Hundert Metern haben jedoch nur einen verschwindend geringen Effekt für die Wasserlebewesen, da der Energieaustausch über die Wasseroberfläche nur sehr langsam abläuft (Frey et al. 2003b). Für die Lebensgemeinschaften kann durch kleine Aufweitungen keine genügend grosse Variation erreicht werden. Es besteht zudem die Gefahr, dass es zu einer vollständigen Elimination ganzer Populationen kommt, da ein grosses Hochwasserereignis einzelne kleinere Aufweitungen (im Gegensatz zu grossen) praktisch auf der gesamten Fläche beeinflussen kann (Tockner et al. 2000). Wichtig ist, dass mehrere Lebensräume mit unterschiedlichen Lebensbedingungen miteinander verbunden sind.

Stillwasserzonen/Totarme

Ziel: Stillwasserzonen und Totarme, welche keine oder nur kleine Fließgeschwindigkeiten aufweisen, werden für eine Vergrößerung der Lebensraumvariabilität wieder ans Gewässer angebunden.

Wirkung auf Wassertemperatur

In den flachen, stehenden Bereichen kann sich Wasser durch die Sonneneinstrahlung stark erwärmen oder bei kalter Umgebungsluft auch deutlich abkühlen. Durch die in unseren Breiten maximal mögliche Einstrahlung von rund 1000 Wm^{-2} kann sich zum Beispiel ein 20 cm tiefes, unbeschattetes Wasserbecken innerhalb von einer Stunde um mehr als 4°C erwärmen¹⁵. Dadurch kann die Temperaturvariabilität und die Vielfalt der Lebensbedingungen für verschiedene Arten vergrößert werden. Für die Temperatur des Hauptflusses ist der Einfluss jedoch vernachlässigbar, da der Wasseraustausch mit den stillstehenden Zonen nur klein ist. Falls die Zugänglichkeit gegeben ist, sind Stillwasserzonen jedoch wichtige Rückzugsgebiete für Fische.

Entlastungskanal

Ziel: Entlastungskanäle werden gebaut, um Schwall/Sunk-Wellen vom Hauptgerinne fernzuhalten.

Effekt auf Wassertemperatur

Dank dem Entlastungskanal fehlen im Hauptgerinne die kurzfristigen Temperaturschwankungen durch Schwall/Sunk. Das Wasser im Hauptgerinne würde nicht durch den Kraftwerkseinfluss abgekühlt. Das Hauptgerinne hat jedoch weniger Wasser, da ein Teil periodisch im Entlastungskanal abgeleitet wird. Dadurch werden Restwassereffekte verstärkt, d.h. dass sich das Wasser im Sommer stärker erwärmt und im Winter mehr auskühlt. Bei der Rhone wäre dies eine Korrektur in Richtung der natürlichen Bedingungen, da der Jahresgang gegenüber der unbeeinflussten Situation geglättet ist.

Die Wassertemperatur der Nebengerinne ist durch Schwall/Sunk-Effekte noch stärker betroffen, da ihr Wasser nicht mit unbeeinflusstem Wasser gemischt wird.

Bessere Anbindung von Seitengewässern

Ziel: Mit der besseren Anbindung von Seitengewässern soll die laterale Vernetzung von ehemals für Fließgewässerorganismen nicht zugänglichen Seitengewässern verbessert werden. Insbesondere sollten Fische ungehindert die Laich- und Rückzugsgebiete der Seitengewässer erreichen können.

Effekt auf Wassertemperatur

Die bessere Anbindung von Seitengewässern hat keinen direkten Einfluss auf die Wassertemperatur der Rhone. Sie macht jedoch für die in der Rhone lebenden Organismen einen zusätzlichen Lebensraum mit unterschiedlicher Wassertemperatur zugänglich. Bei thermisch beeinflussten Gewässern können deshalb Seitengewässer wichtige Rückzugsgebiete darstellen (Tockner et al. 2000).

¹⁵ Natürlich wirken nach einer solch starken Erwärmung auch kühlende Effekte wie die langwellige Abstrahlung, Verdunstung und Wärmeleitung und verhindern eine Überhitzung.

Überschwemmungsflächen

Ziel: Bei Hochwasser werden Überschwemmungsflächen überflutet und als Folge davon Hochwasserspitzen gekappt.

Effekt auf Wassertemperatur

Kein relevanter Effekt, da bei Hochwassern die Wassertemperatur beim Durchqueren der Überschwemmungsflächen keine wichtige Rolle spielt und die Wassertemperatur im Hauptgerinne durch das Überfluten vom Umland praktisch nicht beeinflusst wird.

6.3.2 Massnahmen bei Wasserkraftwerken

Rückhaltebecken

Ziel: Rückhaltebecken unterhalb von Wasserkraftwerken werden gebaut, um die Schwall/Sunk-Effekte im Abfluss zu glätten.

Effekt auf Wassertemperatur

Da das in das Rückhaltebecken eingeleitete turbinierete Wasser kontinuierlich abgegeben wird, bleiben unterhalb des Kraftwerksauslass bei der Wassertemperatur kurzfristige Temperatursprünge aus. Das Rhonewasser wird durch die kleinere (über eine längere Zeitdauer) zugeführte Menge des turbiniereten Wassers weniger stark beeinflusst. Das Temperaturregime ist jedoch gegenüber der unbeeinflussten Situation immer noch durch die Kraftwerksnutzung verändert.

Veränderung der Temperatur des turbiniereten Wassers

Ziel: Falls das Flusswasser eine ähnliche Temperatur wie das turbinierete Wasser aufweist, gibt es keine Schwall/Sunk-Effekte bei der Temperatur. Technisch lässt sich diese Massnahme durch eine Wasserentnahme im Stausee auf variabler Höhe (Abbildung 30 und Abbildung 31) lösen, falls das Wasser im Stausee über die Tiefe nicht die gleiche Temperatur aufweist.

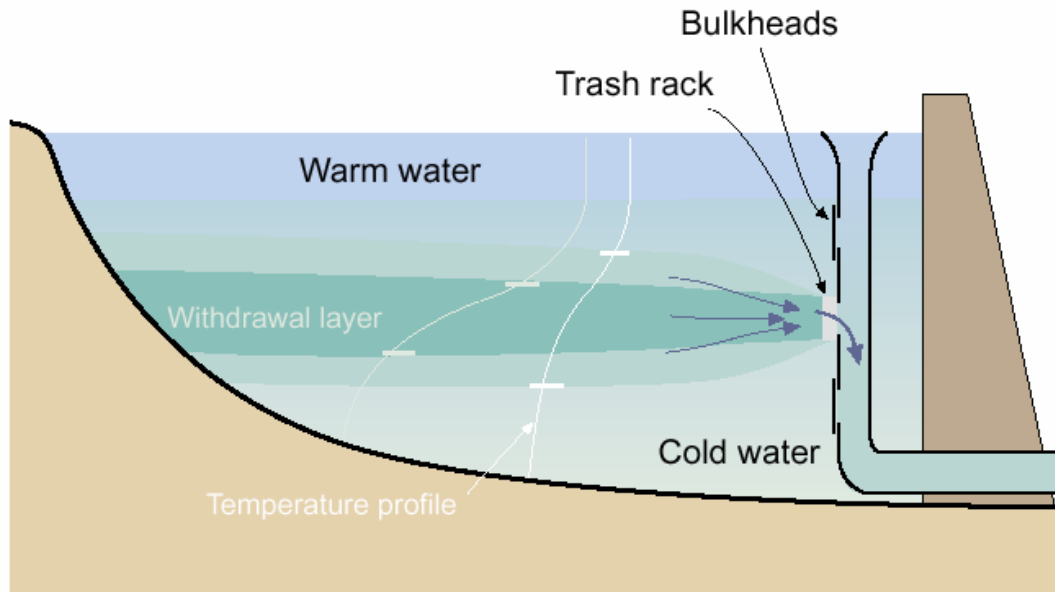


Abbildung 30: Wasserentnahme in verschiedenen Wassertiefen durch eine Röhre mit mehreren verschliessbaren Einlässen auf unterschiedlichen Höhen (aus Sherman 2000).

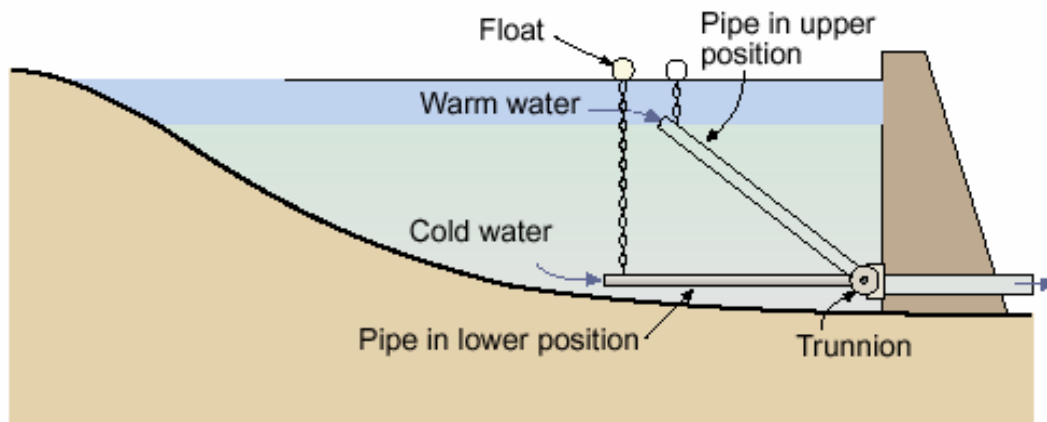


Abbildung 31: Skizze einer Einrichtung, mit der Wasser aus unterschiedlichen Tiefen des Stausees entnommen werden kann (aus Sherman 2000).

Effekt auf Wassertemperatur

Falls ähnlich warmes Wasser wie im Fluss zugeleitet werden kann, gibt es bei der Wassertemperatur unterhalb von Kraftwerksauslässen keine grossen und kurzfristigen Temperaturänderungen mehr. Diese Massnahme lässt sich bei den grossen Stauseen jedoch nur umsetzen, falls die Wassertemperatur über die Tiefe variabel ist. Bei den trüben Stauseen von Grande Dixence und Mauvoisin erwärmt sich das Wasser praktisch nicht (Abbildung 9). Nur beim relativ klaren Stausee Emosson, bei dem sich die obersten Schichten erwärmen, wäre diese Massnahme möglich.

Koordination der Betriebsdauer der Wasserkraftwerke

Ziel: Mit einem koordinierten Betrieb der verschiedenen Wasserkraftwerke könnten Schwall/Sunk-Spitzen ausgeglichen statt verstärkt werden.

Da im Wallis viele Wasserkraftwerke von unterschiedlichen Gesellschaften Spitzenstrom produzieren, also bei hohem Strombedarf viele Turbinen betrieben werden, ist eine solche Massnahme organisatorisch und technisch nur schwer umsetzbar sowie ökonomisch unvorteilhaft für den geringen Effekt auf die Wassertemperatur.

6.4 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE RHONE

Im Vordergrund sollten Massnahmen stehen, welche eine grössere Temperaturvariabilität hervorrufen. Aus diesem Grund sind Aufweitungen, die bessere Anbindung bzw. Schaffung von Seitenarmen und Totarmen sowie grossflächige Flachwasserzonen sinnvolle Massnahmen. Kleine Aufweitungen mit einer Länge von wenigen Hundert Metern haben vernachlässigbare Effekte auf die Wassertemperatur. Es braucht grosse Aufweitungen mit abgetrennten Pools. Eine permanente Anbindung dieser Bereiche ist nicht nötig, aber die Stillwasserzonen sollten nicht trocken fallen.

Eine variable Wasserentnahmetiefe in Reservoirs ist nur bei Stauseen mit einer Temperaturvariation über die Tiefe wie z.B. bei Emosson möglich. Sinnvoller sind aber Rückhaltebecken, welche neben dem positiven Effekt auf die Wassertemperatur auch die Schwall/Sunk-Spitzen im Abfluss glätten.

6.5 ZUSAMMENFASSUNG DER VERBESSERUNGSMASSNAHMEN

Tabelle 29: Zusammenfassung der in Kapitel 6 vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen und deren Effekt auf die Temperatur.

Massnahme	Effekt auf Temperatur	Bewertung
Aufweitungen	Es gibt eine raschere Anpassung an die Gleichgewichtstemperatur und eine höhere Temperaturvariabilität quer und längs zum Fluss.	Kleine Aufweitungen mit Längen von wenigen Hundert Metern haben nur einen vernachlässigbaren Effekt, es sollten sich Totarme und unterschiedlich tiefe Zonen bilden können.
Stillwasserzonen/ Totarme	Es entstehen Zonen mit unterschiedlichen Temperaturen, auf die Temperatur des Hauptgerinnes hat diese Massnahme jedoch kaum einen Einfluss.	Falls die Zugänglichkeit gegeben ist, können diese Zonen für einzelne Arten überlebenswichtig sein.
Entlastungskanal	Die Temperatur im Hauptgerinne wird naturnaher, es treten jedoch Restwassereffekte auf.	Die Restwassereffekte wären bei der Rhone eine Korrektur in die Richtung natürlicher Bedingungen, da die Temperaturkurve gegenüber der natürlichen Situation abgeflacht ist.
Bessere Anbindung von Seitengewässern	Es erfolgt keine direkte Veränderung der Temperatur des Hauptgerinnes.	Die Seitengewässer können wichtige Rückzugsgebiete darstellen und haben für die Artenvielfalt eine bedeutende Rolle.
Überschwemmungsflächen	Kein Effekt auf die Wassertemperatur.	Für Temperatur keine Bedeutung.
Rückhaltebecken	Es fallen die kurzfristigen Temperaturschwankungen weg, die Tages- und Monatsmittelwerte werden aber nicht verändert.	Kurzfristige Temperaturveränderungen werden verringert. Das Temperaturregime bleibt gegenüber der natürlichen Situation verändert.
Veränderung der Temperatur des turbinieren Wassers	Würde bei den untersuchten Reservoirs nur im Stausee Emosson einen Effekt bringen, da dort die Temperatur in den obersten Schichten mit der Tiefe variiert.	Technisch aufwändig

Koordination der Betriebsdauer der Kraftwerke	Schwall/Sunk-Effekte werden ausgeglichen.	Da viele Kraftwerke Spitzenstrom produzieren, ist eine solche Massnahme aus organisatorischen und ökonomischen Gründen nicht umsetzbar.
--	---	---

7 DANK

Die Autoren möchten sich bei den folgenden Personen und Institutionen für die Unterstützung bedanken:

- Armin Peter für die Leitung des Gesamtprojekts und Sharon Nutter für die Koordination der Teilprojekte
- Martin Schmid, für inhaltliche Beiträge und Rückmeldungen zum Bericht
- Michael Schurter für die Vorbereitung und Durchführung der Messkampagnen und die Aufbereitung der Rohdaten.
- Michael Brögli, für die Auswahl der Messstellen und den Start des Messprogramms in der Rhone und ihren Zuflüssen
- Christine Weber, Achim Pätzold, Armin Peter, Tom Gonser und Klement Tockner für ihren Beitrag zur Beeinflussung der Fische und der benthischen Organismen
- Markus Fette, für inhaltliche Beiträge und den Unterhalt der Datenbank
- Romaine Perraudin für Auskünfte zur Situation im Rhonetal
- Johann Savioz (Kraftwerk Mauvoisin), Bertrand Daubord (Kraftwerk Emosson) und Jean-Michel Bonvin (Kraftwerk Grande Dixence), für die Erlaubnis zu den Messungen in den Stauseen
- Kraftwerke Emosson, St. Léonard und Rhonewerke AG für die Erlaubnis zum Anbringen von Temperatursonden im Kraftwerksgelände
- Kraftwerke EnAlpina, Rhonewerke AG, Societe Leteygeon SA, SA l'Energie de l'Ouest-Suisse, Ingenieurbüro Schneller Ritz und Partner AG und Ingenieurgemeinschaft Westschweiz, für Informationen zu den Kraftwerken an der Lonza und der Borgne
- Bundesamt für Wasser und Geologie und Meteo Schweiz für Datenlieferungen und Auskünfte
- Personen, welche bei den Messkampagnen mitgeholfen haben und hier noch nicht namentlich erwähnt wurden.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Arscott, D. B., Tockner, K. & Ward, J. V. (2001). Thermal heterogeneity along a braided floodplain river in the Alps. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 2358-2373.
- Beitinger, T. L., Bennett, W. A. & McCauley, R. W. 2000. Temperature tolerance of north american freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature. *Environmental Biology of Fishes*, 58, 237-257.
- Bonjour, C. (1998). Modellierung des Wärmeaustausches über die Wasseroberfläche eines Gebirgsbachs. Diplomarbeit, EAWAG Dübendorf.
- BWG (Hrsg.) (2001). Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Landeshydrologie.
- BWG (Hrsg.) (2002). Hydrologisches Jahressbuch. Bundesamt für Landeshydrologie.
- Canton du Valais (Hrsg.) (1999). 3^{ème} Correction du Rhone: Projet General, Donnees de base. Milieux naturels. Bericht des kantonalen Service des routes et des cours d'eau. 70 S.
- Département fédéral de l'intérieur (1964). La correction du Rhône en amont du lac Léman, Publication du Service fédéral des routes et des digues, Bern.
- EAWAG (1997). Auswirkungen des Kernkraftwerkes Mühleberg auf den Wärmehaushalt der Aare. Auftrag Nr. 84'218, EAWAG Dübendorf.
- EAWAG (Hrsg.) (2002). EAWAG News, 55d, «Alpine Wasserkraftwerke und ihre «Fernwirkung» auf talwärts liegende Gewässer», EAWAG Dübendorf.
- Elliot, J.M. (1981). Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. In *Stress and Fish* (A. D. Pickering, ed), 209-245. London, Academic Press
- ETHZ (Hrsg.) (2003). Fallstudie Thur – Perspektiven einer Flusslandschaft. Bernhard Wehrli, ETH Zürich.
- Forel, F.A. (1892, reprint 1998): Le Léman: Monographie limnologique. Lausanne, Rouge. (Band I, 5. Teil („Hydrologie“), 364ff. Slatkine Reprints, Genève).
- Forstenlechner, E., Hütte, M., Bundi, U., Eichenberger, E., Peter, A. & Zobrist, J. 1997. Ökologische Aspekte der Wasserkraftnutzung im alpinen Raum. Zürich: vdf, Hochschulverlag an der ETH.
- Frey, M. (2003). Temperaturmodellierung – Auswirkungen von Kraftwerken auf das Temperaturregime in Zuflüssen der Rhone. Diplomarbeit, ETH Zürich/EAWAG Kastanienbaum.
- Frey, M., Meier, W. & Moosmann, L. (2003a). Bericht über die Messung in den Stauseen: Lac des Dix, Lac de Mauvoisin und Lac d'Emosson. Rhone-Thur Publikation, EAWAG Kastanienbaum.

- Frey, M., Schmid, M., & Wüest, A. (2003b). Einfluss von Aufweitungen auf das Temperaturregime der Thur. EAWAG Kastanienbaum.
- GBL (2003). Veränderungen im Ökosystem Brienersee, Expertenbericht der Phase II „Prioritätensetzung“, GBL, Bern.
- Hari, R. & Güttinger H. (2004). Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978 bis 2002 – Auswertungen und grafische Darstellungen fischrelevanter Parameter. Teilprojekt-Nr. 01/08. Fischnetz-Publikation, EAWAG, Dübendorf.
- Jakob, A., Liechti, P., & Schädler, B. (1996). Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? Gas, Wasser, Abwasser, 76, 288-294.
- Kanton Wallis (Hrsg.) (2000). Dritte Rhonekorrektur – Sicherheit für die Zukunft. Sion.
- Kuhn, W. (1977). Berechnung der Temperatur und Verdunstung alpiner Seen auf klimatologisch-thermodynamischer Grundlage. Arbeitsbericht der SMA, 70, SMA Zürich.
- Küttel, S., Peter, A. & Wüest, A. (2002). Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. Rhone-Thur-Projekt Publikation Nr. 1: 36 S.
- LeRoy, N., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. & Stromberg, J.C. (1997). The Natural Flow Regime. BioScience, 47 (11), 769-784.
- Lyytikäinen, T. & Jobling, M. 1998. The effect of temperature fluctuations on oxygen consumption and ammonia excretion of underyearling Lake Inari Arctic charr. Journal of Fish Biology, 52, 1186-1198.
- Meier, W. (1996). Veränderungen des Temperaturhaushaltes der Aare durch das Kernkraftwerk Mühleberg. Diplomarbeit, EAWAG/ETH Zürich.
- Meier, W. (2002). Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. Dissertation Nr. 14'526, ETH Zürich.
- Meier, W., Bonjour, C., Wüest, A. & Reichert, P. (2003). Modelling Temperature of Mountain Streams. Journal of Environmental Engineering, 129 (8), 755-764.
- Mosley, M.P. (1983). Variability of water temperature in the braided Ashley and Rakaia rivers. N.Z.J. Mar Fresh. Res., 17, 331-342.
- Moss, S. A. 1970. The responses of young american shad to rapid temperature changes. Transactions of the American Fisheries Society, 2, 381-384.
- Sherman, B. (2000). Scoping options for mitigating cold water discharges from dams. CSIRO Land and Water, Canberra
- Tockner, K., Malard, F. & Ward, J.V. (2000). An extension of the flood pulse concept. Hydrological Processes, 14, 2861-2883.
- Utrecht, E. (1906). Die Ablation der Rhone in ihrem Walliser Einzugsgebiete im Jahre 1904/05. Zeitschrift für Gewässerkunde, 7, 257 - 320.

- Vehanen, T., Bjerke, P. L., Heggenes, J., Huusko, A. & Maki-Petays, A. (2000). Effect of fluctuating flow and temperature on cover type selection and behaviour by juvenile brown trout in artificial flumes. *Journal of Fish Biology*, 56, 923-937.
- Vivian, H. (1989). Hydrological Changes of the Rhone River. Kapitel 4 in: Petts, G.E., Möller, H., Roux, A.L. (Eds.): *Historical Change of large alluvial Rivers: Western Europe*, John Wiley & Sons, Chichester, 57 - 77.

9 ANHANG

9.1 Temperaturmessstellen

9.2 Bestimmung der relevanten Zuflüsse in die Rhone

9.3 Talsperren im Kanton Wallis

9.4 Abschätzung der Ausgleichszeiten von Rhone und Seitenbächen

9.1 TEMPERATURMESSSTELLEN

Ort	Nr.	Koordinaten	Gewässertyp
Brig	1L	642 198 / 130 028	Hauptfluss (Rhone)
Brig	1R	642 190 / 130 072	Hauptfluss (Rhone)
Saltina	2	641 703 / 129 797	Seitenbach
Vispa	3	633 398 / 127 830	Seitenbach
Grossgrund-/Schnydrigenkanal	4	626 142 / 128 315	Kanal
Gampel	5L	626 152 / 128 357	Hauptfluss (Rhone)
Gampel	5R	626 124 / 128 423	Hauptfluss (Rhone)
Lonza	6	623 475 / 128 434	Seitenbach
Dala	7	614 146 / 129 434	Seitenbach
Sierre	8L	608 885 / 127 052	Hauptfluss (Rhone)
Sierre	8R	608 885 / 127 052	Hauptfluss (Rhone)
Kraftwerk Chippis-Rhone	9	608 340 / 125 759	Kraftwerk
Kraftwerk Chippis-Navisence	10	608 134 / 125 695	Kraftwerk
Navisence	11	607 984 / 125 591	Seitenbach
Granges	12L	601 578 / 123 704	Hauptfluss (Rhone)
Granges	12R	601 579 / 123 704	Hauptfluss (Rhone)
Canal de Granges	13	598 824 / 121 136	Kanal
Borgne	14	595 718 / 121 388	Seitenbach
Sion	15L	594 723 / 120 128	Hauptfluss (Rhone)
Sion	15R	594 723 / 120 128	Hauptfluss (Rhone)
Chandoline (Grande Dixence)	16	595 068 / 119 114	Kraftwerk
Morge	17	589 973 / 117 563	Seitenbach
Lizerne (vor Kraftwerk)	18	585 967 / 118 373	Seitenbach
Kraftwerk Ardon	19	585 967 / 118 373	Kraftwerk
Lizerne (Mündung)	20	587 905 / 116 601	Seitenbach
Nendaz	21L	588 397 / 116 535	Hauptfluss (Rhone)

Nendaz	21R	588 397 / 116 535	Hauptfluss (Rhone)
Nendaz (Grande Dixence)	22	585 247 / 114 601	Kraftwerk
Canal de Ceinture	23	581 718 / 113 819	Kanal
Riddes (Mauvousin)	24	581 301 / 112 355	Kraftwerk
Fully	25L	575 484 / 109 359	Hauptfluss (Rhone)
Fully	25R	575 484 / 109 359	Hauptfluss (Rhone)
Canal de Fully	26	571 361 / 107 905	Kanal
Dranse	27	571 245 / 107 837	Seitenbach
La Batiаз (Emosson)	28	571 454 / 107 698	Kraftwerk
Kraftwerk St.Léonard	29	600 492 / 123 181	Kraftwerk
Turtmäna	30	619 394 / 128 510	Seitenbach
Borgne Z (Les Haudères)	Bor1	605 165 / 103 538	Seitenbach
Borgne de Ferpècle (Les Haudères)	Bor2	605 141 / 103 352	Seitenbach
Borgne d'Arolla (Les Haudères)	Bor3	605 117 / 103 451	Seitenbach
Borgne (Arolla)	Bor4	603 845 / 094 297	Wasserfassung
Borgne Z (Les Grangettes)	Bor5	598 458 / 114 341	Seitenbach
Borgne (Les Grangettes)	Bor6	598 949 / 113 858	Seitenbach
Dixence (Les Grangettes)	Bor7	598 405 / 113 909	Seitenbach
Lonza (Kippel)	Lon8	624 528 / 138 557	Seitenbach
Lonza (Riti)	Lon9	624 352 / 136 125	Seitenbach
Lonza (Greber)	Lon10	624 528 / 133 557	Seitenbach
Lonza (Gampel)	Lon11	623525 / 129790	Seitenbach
Lonza Kraftwerk Gampel	Lon12	623 536 / 129 789	Kraftwerk

L bezeichnet orographisch (in Fliessrichtung) linksseitig, R rechtsseitig und Z steht für eine Messstelle unterhalb des Zusammenflusses zweier Bäche.
Die Messstellen an der Borgne und der Lonza sind in Frey (2003) detaillierter beschrieben.

9.2 BESTIMMUNG DER RELEVANTEN ZUFLÜSSE IN DIE RHONE

Michael Brögli hat die relevanten Zuflüsse (Seitenflüsse, Kanäle und Kraftwerksauslässe) bestimmt, welche bei der Messkampagne berücksichtigt werden sollten. In den untenstehenden Tabellen sind seine Resultate zusammengefasst. Mit den Messstellen in den Seitenflüssen und Kanälen werden rund 75% der Zuflüsse berücksichtigt.

Nummer *	Seitengewässer	Nat.Abflüsse 1961-1980 [m ³ /s]	Gewichtungs- faktor	Hydroelektr. Nutzung	Einleitungs- ort	Umrechnung (Eigene Annahmen)	Berechnet (m ³ /s)	Gerundet (m ³ /s)	Anteil (%)	Position*
2	Rhone (bei Brig)	38.4	1	3.3% weg	Rhone	38.4*0.967	37.1	37.1	32.3%	1L/1R
37	Saltina	2.36	1	intern	Rhone		2.36	2.4	2.1%	2
13	Mundbach		1	0%	Rhone	(1.4/3)	0.47	0.5	0.4%	
200	Gamsa	1.4	1	30% weg	Rhone	(1.4/3)*0.7	0.33	0.3	0.3%	
14	Baltschiederbach		1	0%	Rhone	(1.4/3)	0.47	0.5	0.4%	
40	Vispa/Matter Vispa	23.5	1	30% weg	Rhone	23.5*0.7+0.33	16.78	16.8	14.6%	3
15	Biedschbach	3.2	3	0%	Rhone	(3.2/11)*3	0.87	0.9	0.8%	
152	Grossgrundkanal		6	intern	Rhone	(3.2/11)*6	1.75	1.8	1.6%	4
122	Galdi/Kanal Raron-Steg		2	0%	Rhone	(3.2/11)*2	0.58	0.6	0.5%	
17	Lonza	7.34	1	intern	Rhone	7.34	7.34	7.3	6.4%	6
44	Turtmäna	2.31	1	50% weg	Rhone	2.31*0.5	1.20	1.2	1.0%	
201	Tschingel		1	0%	Rhone	(8.65/16)*1	0.54	0.5	0.5%	
18	Feschilju		2	0%	Rhone	(8.65/16)*2	1.08	1.1	0.9%	
32	Meretschibach	8.65	1	70% weg	Gampinenkanal	((8.65/16)*1)*0.3	0.16	0.2	0.1%	
202	Illbach		2	70% weg	Rhone	((8.65/16)*2)*0.3	0.32	0.3	0.3%	
19	Dala		4	intern	Rhone	(8.65/16)*4	2.16	2.2	1.9%	7

Der Temperaturhaushalt der Rhone und ihrer Seitenbäche

	Gulantschi		1	0%	Rhone	$(8.65/16)*1$	0.54	0.5	0.5%	
20	Raspille		3	0%	Rhone	$(8.65/16)*3$	1.62	1.6	1.4%	
21	Sinièse		2	0%	Rhone	$(8.65/16)*2$	1.08	1.1	0.9%	
45	Navisence	7.21	1	50% weg	Rhone	$7.21*0.5$	3.61	3.6	3.1%	11
49	Borgne	11.5	1	50% weg	Rhone	$11.5 * 0.5$	5.75	5.8	5.0%	14
	Bonne Eau		1	0%	C.du Bras-Noir	$(6.09/13)*1$	0.47	0.5	0.4%	
203	Torrent de Montana		1	0%	C.du Bras-Noir	$(6.09/13)*1$	0.47	0.5	0.4%	
48	Reche		3		C. de Granges	$(6.09/13)*3$	1.41	1.4	1.2%	
204	Dérochia	6.09	1	0%	C. de Granges	$(6.09/13)*1$	0.47	0.5	0.4%	
22	Liène		5	70% weg	Rhone	$(6.09/13)*5*0.3$	0.70	0.7	0.6%	
23	Sionne		2		Rhone	$(6.09/13)*2$	0.94	0.9	0.8%	
205	Ruisseau de Salains		1	0%	Rhone	$(8/33)*1$	0.24	0.2	0.2%	
52	Printse	8	10	50% weg	Rhone	$((8/33)*10)*0.5$	1.21	1.2	1.1%	
24	Morge		12	50% weg	Rhone	$((8/33)*12)*0.5$	1.45	1.5	1.3%	17
25	Lizerne		10	1.45 dazu	Rhone	$(8/33)*10+1.45$	3.87	3.9	3.4%	18,20
53	Fare		4	20% weg	Rhone	$((6/17)*4)*0.8$	1.13	1.1	1.0%	
26	Losentse		3	0%	Rhone	$((6/17)*3)$	1.06	1.1	0.9%	
135	Canal de Ceinture	6	2	0%	Rhone	$((6/17)*2)$	0.71	0.7	0.6%	
27	Salentse		3	0%	Rhone	$((6/17)*3)$	1.06	1.1	0.9%	
138	Canal de Fully		2	0%	Rhone	$((6/17)*2)$	0.71	0.7	0.6%	
164	Canal du Syndicat		3	0%	Rhone	$((6/17)*3)$	1.06	1.1	0.9%	
54	Dranse	21.44+2	1	50% weg	Rhone	$23.44*0.5$	11.72	11.7	10.2%	27
Total		149.4					114.79	115.1	100.0%	

Bedeutung der Kanäle in der Rhoneebene:

Nummer*	Kanal	Bedeutung***	Position
120	Laldnerkanal	+	
152/155	Grossgrund-/Schnydrigenkanal	+++	4
122	Galdikanal	+	
123	Grossgraben	+	
156/157	Putiergraben/Gampinenkanal	+++	
124	Phüla	+	
158	<i>Pfynkanl</i>	+	
125	<i>Russen</i>	+	
126	Canal du Bras-Noir	+	
159	Canal de Granges	+++	13
128	Canal d'Uvrier	+	
162	Canal de Vissigen	+++	
135	Canal de Ceinture/Le Grand Canal	+++	23
138	Canal de Fully (Pumpstation)	++	
138	Canal de Fully**	+++	26
164	Canal du Syndicat**	+++	

Bedeutung:

+++ : grosse Bedeutung

++ : kleine Bedeutung

+ : geringe Bedeutung

*) Nummerierung siehe Fischereikarte des Kanton Wallis

***) Zuströme in Rhone unterhalb Branson, aber oberhalb Dranse

***) Nach eigener Abschätzung (Karten, Gespräche)

Kraftwerk	Speichersee	Maximal mögliche Leistung (MW)	Nutzzinhalt Stausee (Mio. m ³)	Einleitungsort	Position
Steg		110 MW		Lonza	
Chippis-Rhone		40-200		Rhone	9
Chippis-Navisence	Barrages de Moiry	40-200	70	Rhone	10
Turtmann	lac de Turtmann	10-40	0.78	Putiergraben	
Dala	Baltschiederbach	<10		Rhone	
Einleitung in "Lienne"	Vispa/Matter Vispa	<10	unbedeutend	Lienne	
St.Leonard	Barrage de Zeuzier	10-40	50	Rhone	29
Bramois		10-40		Borgne	
Chandoline	Cleuson/Grande Dixence	>200	400+20	Rhone	16
Ardon	Barrage de Derborence	40-200	eher klein	Lizerne	19
Nendaz	Cleuson/Grande Dixence	>200	400+20	Rhone	22
Mauvoisin/Riddes	Barrage de Mauvoisin	>200	180	Rhone	24
Fully**	Lac de Fully	<10	4.2	Canal de Fully	
Martigny-Bourg**		10-40	unbedeutend	Rhone	
Emosson/La Batiatz	Barrage d'Emosson				28

*) Nummerierung siehe Fischereikarte des Kanton Wallis

***) Zuströme in Rhone unterhalb Branson, aber oberhalb Dranse

****) Nach eigener Abschätzung (Karten, Gespräche)

9.3 TALSPERREN IM KANTON WALLIS

Name	Höhe	Baujahr	Volumen in Mio. m ³	Kanton
Grande Dixence	285 m	1961	401.00	Valais/Wallis
Emosson	180 m	1974	227.00	Valais/Wallis
Mauvoisin	250 m	1957	211.50	Valais/Wallis
Mattmark	120 m	1967	101.00	Valais/Wallis
Moiry	148 m	1958	78.00	Valais/Wallis
Proz-Riond	20 m	1957	51.00	Valais/Wallis
Zeuzier	156 m	1957	51.00	Valais/Wallis
Dixence	87 m	1935	50.00	Valais/Wallis
Salanfe	52 m	1952	40.00	Valais/Wallis
Les Toules	86 m	1963	20.15	Valais/Wallis
Cleuson	87 m	1950	20.00	Valais/Wallis
Gries	60 m	1965	18.60	Valais/Wallis
Vieux-Emosson	45 m	1955	13.80	Valais/Wallis
Gebidem	122 m	1967	9.20	Valais/Wallis
Illsee	25 m	1923	6.60	Valais/Wallis
Bortelsee	20 m	1989	3.66	Valais/Wallis
Sanetsch	42 m	1965	2.80	Valais/Wallis
Totensee	20 m	1950	2.60	Valais/Wallis
Ferden	67 m	1975	1.89	Valais/Wallis
Godey	35 m	1974	0.93	Valais/Wallis
Z'Mutt	74 m	1964	0.85	Valais/Wallis
Turtmann	32 m	1958	0.80	Valais/Wallis
Vordersee	15 m	1986	0.56	Valais/Wallis
St-Barthélemy C	51 m	1984	0.50	Valais/Wallis
La Lurette	15 m	1918	0.40	Valais/Wallis
Fionnay GD	31 m	1957	0.30	Valais/Wallis
Les Esserts	20 m	1973	0.26	Valais/Wallis
Châtelard CFF	33 m	1975	0.25	Valais/Wallis
Serra	22 m	1952	0.20	Valais/Wallis
Zen Binnen	22 m	1953	0.17	Valais/Wallis
St-Barthélemy B	45 m	1975	0.15	Valais/Wallis
Plans Mayens	20 m	1971	0.13	Valais/Wallis
Ferpècle	28 m	1964	0.10	Valais/Wallis
Croix	15 m	1955	0.09	Valais/Wallis
Othmarhang	20 m	2000	0.06	Valais/Wallis
Les Marécottes	19 m	1925	0.05	Valais/Wallis
Icogne	17 m	1962	0.04	Valais/Wallis
Giétroz-du-Fond	15 m	1965	0.02	Valais/Wallis
La Fouly	18 m	1972	0.02	Valais/Wallis
Hospitalet	21 m	1962	0.01	Valais/Wallis

9.4 ABSCHÄTZUNG DER AUSGLEICHSZEITEN VON RHONE UND SEITENBÄCHEN

Bei Fließgewässern gibt es eine hypothetische Gleichgewichtstemperatur T^* , bei der die Wärmeflüsse ins Gewässer (Solarstrahlung und langwellige Einstrahlung) und die von der Wassertemperatur abhängigen Energieflüsse aus dem Gewässer (Langwellige Abstrahlung, Verdunstung und Konvektion) gleich gross sind. Aufgrund der ständig ändernden Randbedingungen (Meteorologische Parameter, Abflussverhältnisse, Gerinnemorphologie) ist die Wassertemperatur von Fließgewässern praktisch nie identisch mit der Gleichgewichtstemperatur. Das Prinzip der Gleichgewichtstemperatur kann aber verwendet werden, um die Ausgleichszeit $t_A^{0.05}$ zu berechnen, innerhalb der sich die Wassertemperatur zu 5% an die Gleichgewichtstemperatur angenähert hat.

$$t_A^{0.05} = 3 \frac{h \cdot \rho \cdot c_p}{A}$$

wobei A: Austauschkoeffizient [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] genannt wird und

$$A = \frac{dH_{out}}{dT_w} \text{ bei } T^*.$$

Typische Ausgleichszeiten für die Rhone:

Mit einem Ausgleichskoeffizienten von $35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (maximaler Wert für Juli in Kuhn 1977) und einer angenommenen mittleren Tiefe von 2 m ergibt sich eine Ausgleichszeit von 200 h. Die Zeit, bis sich die Wassertemperatur bis zu 37% an die Gleichgewichtstemperatur angenähert hat, beträgt 67 h. Dies entspricht mit einer angenommenen Fließgeschwindigkeit von 1 ms^{-1} einer Fließstrecke von rund 240 km.

Zum Vergleich: Bei der Aare unterhalb Bern, welche ebenfalls kanalisiert (und teilweise eingestaut) ist, werden auf der 20 km langen Strecke zwischen dem Kernkraftwerk Mühleberg und dem Bielersee nur zwischen 2 und 12% der eingetragenen Wärme an die Atmosphäre abgegeben.