

Diplomarbeit

Temperaturmodellierung -
Auswirkungen von
Kraftwerken auf das
Temperaturregime in
Zuflüssen der Rhône

ETH Zürich/EAWAG
Forschungszentrum für Limnologie
Kastanienbaum
APEC

Verfasser:

Martin Frey

Betreuung:

Prof. Dr. Alfred Wüest
Dr. Martin Schmid
Dr. Werner Meier
Lorenz Moosmann

Rhône-Thur Projekt Publikation Nr. 2
März 2003

Zusammenfassung

Um die Auswirkungen der hydroelektrischen Kraftwerke auf die Rhône und ihre Zuflüsse im Wallis (Schweiz) zu analysieren, wurden im Sommer 2002 an ausgewählten Stellen Temperaturaufzeichnungen durchgeführt.

Die Messungen belegen den Einfluss hydroelektrischer Kraftwerke auf die Flusswassertemperatur: Hohe Temperaturen auf den Restwasserstrecken und durch den intermittierenden Kraftwerksbetrieb verursachte unnatürlich hohe Temperaturschwankungen.

Um das Temperaturregime eines Flusses mit und ohne Kraftwerk zu vergleichen, wird, basierend auf einem hydraulischen Modell, ein Wärmehaushaltsmodell erstellt. Die Modellierungen werden für den genauer untersuchten Rhône-zufluss Lonza durchgeführt.

Um die spezifische Situation der Lonza abzubilden, werden die hydraulischen Parameter mit Tracerversuchen und Messungen vor Ort abgeschätzt. Das Wärmehaushaltsmodell wird mit den Temperaturmessdaten geeicht. Die Berechnungen werden mit dem Programm AQUASIM 2.1 durchgeführt. Als äussere Bedingungen werden zusätzlich die meteorologischen Daten des Monats September 2002 verwendet.

Das Modell zeigt bei hydroelektrischer Nutzung am Ende der 7.5 km langen Restwasserstrecke (5% der natürlichen Wassermenge) der Lonza eine gegenüber dem unbeeinflussten Zustand um 3.1°C erhöhte Temperatur. 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 $1.2\text{-}1.4^{\circ}\text{C}$ kühler, als dies ohne Eingriffe der Fall wäre.

Durch die hydraulische Nutzung wird dem Fluss etwa 85% der potenziellen Energie entzogen, welche auf der natürlichen Fließstrecke in Reibungswärme umgewandelt worden wäre. Durch die Verkleinerung (infolge eines stark reduzierten Abflusses) der Wasseroberfläche auf der Restwasserstrecke wird zusätzlich weniger Energie durch Austauschprozesse mit der Atmosphäre zugeführt. Bei einem Abfluss von $10\text{ m}^3/\text{s}$ beträgt der Energieverlust der Lonza durch die fehlende Dissipation (Reibungswärme) und den verringerten Austausch mit der Atmosphäre 55 MW und verteilt sich im Verhältnis 9:2 auf beide Prozesse.

Betrachtet man die Produktionsdaten aller Kraftwerke im Einzugsgebiet der Rhône bis Martigny, führt die durch die hydroelektrische Nutzung entzogene Energie zu einer Wassertemperaturerniedrigung in Martigny von 1.2°C im Sommer. Berücksichtigt man zusätzlich die veränderten Bedingungen auf den Restwasserstrecken, resultiert (unter der Annahme ähnlicher Bedingungen wie bei der Lonza) eine zusätzliche Temperaturerniedrigung in der Grössenordnung von 0.3°C (insgesamt 1.5°C).

Verdankung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in irgendeiner Form bei dieser Arbeit unterstützt haben:

Herr Prof. Alfred Johny Wüest, unter dessen Leitung die Arbeit entstand, hat mich mit kritischen Diskussionen und Anregungen unterstützt.

Meine Betreuer Dr. Werner Meier, Dr. Martin Schmid und Lorenz Moosmann haben mich in die Arbeit eingeführt, bei der Feldmessung unterstützt und bei Fragen und Problemen konnte ich mich immer an sie wenden.

Bei meinen Messungen im Feld durfte ich immer auf die tatkräftige Unterstützung von Michael Schurter zählen.

Weiter möchte ich es nicht versäumen, mich bei der ganzen Aphys Gruppe für die spannenden Diskussionen und beim ganzen EAWAG-Team Kastanienbaum für das angenehme Arbeitsklima zu bedanken.

Für die Datenbeschaffung der Kraftwerksunterlagen konnte ich vom Wissen und den Kontakten von Markus Fette und Dr. Armin Peter profitieren.

Für die zur Verfügung gestellten Datenunterlagen möchte ich mich bei den Betreibern der Kraftwerke EnAlpina, Rhonewerke AG, Societe Leteygeon SA, SA l'Energie de l'Ouest-Suisse, dem Ingenieurbüro Schneller Ritz und Partner AG und der Ingenieurgemeinschaft Westschweiz bedanken.

Das Bundesamt für Wasser und Geologie und die MeteoSchweiz haben uns freundlicherweise ihre wertvollen Daten unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

Last, not least gebührt ein ganz spezieller Dank Max und Antonia Frey und Christine Guntern, die für mich und die Arbeit viel Verständnis aufbrachten, mich dabei unterstützten und mir in vielfältiger Weise halfen.

Wenn im begrenzten zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit gewisse Aspekte auch nur gestreift werden konnten, so hoffe ich doch, dass es mir gelungen ist, aufzuzeigen in wie vielfältiger Weise die Wassertemperatur im Rhônegebiet durch natürliche Energiequellen und durch die Kraftwerke beeinflusst wird. Auf alle Fälle habe ich im Verlaufe dieser Diplomarbeit viel gelernt und konnte wertvolle Erfahrungen sammeln.

Kastanienbaum, 16. Februar 2003

Martin Frey

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	1
1.1	Temperaturprojekt	2
2	Einleitung	3
2.1	Wassertemperatur	3
2.2	Natürliche Einflüsse	3
2.3	Künstliche Eingriffe in das Gewässerregime	4
2.4	Ziele der Arbeit	5
3	Untersuchungsgebiete	6
3.1	Lonza	7
3.2	Borgne	7
4	Hydraulikmodell	10
4.1	Modellgleichungssystem	10
4.1.1	Gleichungssystem von St. Venant	10
4.1.2	Transport/Reaktionsgleichung	11
4.1.3	Totzonenmodell	11
4.2	Verwendete Eingabedaten	13
4.2.1	Flussgeometrie	13
4.2.2	Fliesswiderstand	14
4.2.3	Dispersion	15
4.3	Tracerversuch	16
4.3.1	Übertragung auf die ganze Strecke	17
5	Wärmehaushaltsmodell	18
5.1	Wärmebilanzgleichungen	18
5.1.1	Sedimentparameter	20
5.1.2	Temperatur der Zuflüsse	20
5.2	Energieflüsse	20
5.3	Kurzwellige Strahlung	22
5.3.1	Reflexion	22
5.3.2	Sonneneinstrahlung	23
5.4	Langwellige Einstrahlung	24
5.4.1	Emissivität	24
5.5	Langwellige Ausstrahlung	25
5.6	Verdunstung/Kondensation	25
5.7	Konvektion	26

5.8	Dissipation	27
5.9	Weitere Energieflüsse	27
6	Unsicherheitsanalyse	28
7	Messungen und Analysen in den Untersuchungsstrecken	30
7.1	Lonza	30
7.1.1	Streckenabschnitt Blatten-Ferden	31
7.1.2	Streckenabschnitt Ferden-Gampel	37
7.1.3	Streckenabschnitt Gampel-Rhône	43
7.2	Borgne	46
7.2.1	Abschnitt Arolla-Les Haudères	47
7.2.2	Abschnitt Les Haudères-Euseigne	51
7.2.3	Streckenabschnitt Euseigne-Bramois	55
8	Eichung des Modells	62
8.1	Numerik	62
8.2	Blatten-Kippel	63
8.2.1	Hydraulik	63
8.2.2	Wärmehaushaltmodell	64
8.2.3	Resultate	66
8.3	Gampel-Rhône	69
8.3.1	Hydraulik	69
8.3.2	Wärmehaushaltmodell	70
8.3.3	Resultate	71
8.4	Ferden-Gampel	72
8.4.1	Hydraulik	73
8.4.2	Wärmehaushaltmodell	76
8.4.3	Resultate	77
8.5	Unsicherheitsanalyse	78
8.6	Validierung der Restwasserstrecke	80
9	Modellvoraussagen	83
9.1	Temperaturen auf der Restwasserstrecke	84
9.2	Temperaturvergleich nach der Rückleitung des hydroelektrisch genutzten Wassers	87
9.3	Energiedifferenz zwischen den zwei Szenarien	89
10	Diskussion	91
10.1	Einflüsse hydroelektrischer Kraftwerke auf die Temperatur der Restwasserstrecke	91
10.2	Einflüsse hydroelektrischer Kraftwerke auf den Energieinhalt der Restwasserstrecke	91
10.3	Hydroelektrische Nutzung	92
10.4	Summierte Auswirkungen auf den Unterlauf der Lonza vor der Rhönemündung	93
10.5	Extrapolation auf das Einzugsgebiet der Rhône bis Martigny	93
10.6	Einflüsse der grossen Stauseen	94
10.7	Ausblick	94
A	Messungen	99

B	Unsicherheitsanalyse	102
C	Wärmeverlust der Rhône durch die hydroelektrische Nutzung	106

Kapitel 1

Hintergrund

Diese Arbeit ist integriert in das Rhône-Thur Projekt. In diesem Projekt werden die flussbaulichen Massnahmen an der Rhône (Schweiz, Kanton Wallis) und Thur (Schweiz, Kanton Thurgau) von einer transdisziplinären Forschungsgruppe begleitet. Die Gruppe besteht aus Forschern der EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz), der LCH (Laboratoire de constructions hydrauliques der l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne), WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft), der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau), des BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) und des BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft).

Das Augenmerk dieser Arbeit ist auf die Rhône gerichtet. Die Rhône wie sie sich heute präsentiert, ist eine weitgehend begradigte, durch Hochwasserdämme gebändigte Abflussrinne. Sie hat ihre ökologische Vielfalt und landschaftliche Eigenart weitgehend verloren. Um Sicherheit vor Hochwasser zu gewährleisten ist praktisch die ganze Strecke verbaut.

Die Überschwemmungen der letzten Jahre (1987, 1993 und 2000) haben gezeigt, dass die bestehenden Dämme bei Hochwasser nur ungenügenden Schutz bieten.

Vor dem Hintergrund der Hochwassergefahr wurde vom Kanton Wallis im Jahr 2000 ein Wasserbauvorhaben zur Korrektur der Rhône beschlossen. Das Projekt, welches bis zum Jahr 2030 dauern wird, verfolgt drei Ziele:

1. Verbesserung der Hochwassersicherheit
2. Ökologische Aufwertung des Flussraumes
3. Steigerung der Attraktivität der Flusslandschaft für den Menschen.

Diese Punkte sollten zudem vereinbar mit einer wirtschaftlichen Nutzung der Rhone und ihrer Zuflüsse sein.

Dies ist schon die dritte Rhônekorrektur. Erstmals kommt bei dieser Korrektur neben dem Hochwasserschutz auch der ökologischen Aufwertung des Flussraumes eine wichtige Bedeutung zu, denn man hat erkannt, dass es für eine nachhaltige Entwicklung des Flusses wichtig ist, die ehemals vorhandenen Funktionen und die vielfältigen Lebensräume wiederherzustellen.

Weitere Informationen zum Rhône-Thur Projekt sind auf der Internetseite www.rhone-thur.eawag.ch zu finden.

1.1 Temperaturprojekt

Für die Ökologie von Gewässersystemen ist die Wassertemperatur ein wichtiger Faktor.

Zum Beispiel kommen im Falle der Rhône die unnatürlich tiefen Wassertemperaturen im Sommer und die durch Schwall und Sunk bedingten raschen Temperaturwechsel als mögliche Ursachen für die äusserst geringe Diversität der Fischfauna und des Benthos in Betracht.

Als Teilprojekt der wissenschaftlichen Begleitung wird deshalb das Wärme-regime der Rhône analysiert.

Um das Gewässersystem der Rhône zu verstehen, muss man den Einfluss der hydroelektrischen Wasserkraftwerke kennen. Die Kraftwerke befinden sich dabei vor allem an den Seitenflüssen, wo sie das grosse Gefälle zur Energieproduktion nutzen.

Anhand von einem Wärmehaushaltmodell soll der Ist-Zustand evaluiert werden und die möglichen Auswirkungen von geplanten Massnahmen für die thermische Revitalisierung aufgezeigt werden. Als Grundlage für das Wärmehaushaltsmodell werden in dieser Arbeit die seitlichen Zuflüsse der Rhône betrachtet. Anhand von Beispielen wird der Einfluss der Kraftwerke analysiert und der Einfluss der Seitenbäche auf den Temperaturhaushalt der Rhône quantifiziert.

Kapitel 2

Einleitung

In dieser Arbeit wird das Temperaturregime alpiner Fließgewässer analysiert, die durch Wasserkraftwerke genutzt werden.

2.1 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur hat einen grossen Einfluss auf die Wasserqualität und die aquatische Biota (Flora und Fauna) von Flüssen und Bächen. Sie beeinflusst den Stoffwechsel, die Atmung und die Toleranz von Tieren und Pflanzen gegenüber Parasiten, bestimmt physikalische und chemische Eigenschaften von Wasser wie Dampfdruck, Oberflächenspannung, Dichte, Viskosität, Diffusivität, Löslichkeit von Gasen (z.B. Sauerstoff) und die Geschwindigkeitsrate chemischer Reaktionen und physikalischer Austauschprozesse [MH94, Web96].

Hohe Wassertemperaturen während einer langen Zeit in den warmen Monaten, grosse Tagesschwankungen oder tiefe Temperaturen im Winter können für die aquatische Biota tödlich sein [GMA98].

2.2 Natürliche Einflüsse

Die Wassertemperatur in Fließgewässern wird durch Austauschprozesse mit der Umgebung (Atmosphäre) beeinflusst. Das Gewässer nimmt auf der einen Seite Wärme auf, gibt diese aber auch wieder an die Umgebung ab.

Die Grösse der einzelnen Wärmeflüsse ist von der Flusscharakteristik und verschiedenen äusseren Bedingungen abhängig.

Die wichtigsten Energieflüsse, welche die Wassertemperaturen in Fließgewässern erhöhen, sind die kurzwellige Sonneneinstrahlung, die langwellige Einstrahlung aus der Atmosphäre, sowie die Erwärmung durch die Reibung. Die Wärmeabgabe erfolgt hauptsächlich über die langwellige Abstrahlung des Wassers. Die genaue Erklärung inklusive mathematischer Beschreibung dieser und weiterer Wärmeflüsse folgt im Kapitel 5.

Die Austauschprozesse mit der Umgebung finden über die Wasseroberfläche (Atmosphäre) und das Gewässerbett (Sediment) statt. Wie stark sich die Wärmeflüsse auf die Temperatur des Flusses auswirken, ist abhängig vom Wasservolumen. Da bei einer Volumenvergrößerung, die Wasseroberfläche proportional weniger zunimmt als das Volumen, haben die Energieflüsse bei kleinem

Abfluss einen grösseren Einfluss auf die Wassertemperatur, als bei einem grossen Volumen.

2.3 Künstliche Eingriffe in das Gewässerregime

Auch zivilisatorische Eingriffe in die Flussdynamik, seien es bauliche Massnahmen, Wasserentnahmen und Wassereinleitungen, können das Temperaturregime eines Flusses verändern.

In dieser Arbeit werden die Temperaturveränderungen von Flüssen, welche hydroelektrisch (Entnahmen und Einleitung von Wasser zur Gewinnung von Strom) genutzt werden, untersucht.

Schon in früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Wasserentnahme zu Veränderungen der Wassertemperatur führt.

- Morse [Mor72] berechnete für den Little Deschutes River in Oregon (durchschnittlicher Abfluss $5.7 \frac{m^3}{s}$) nach 8 und 17 km eine durchschnittliche Temperaturzunahme von $0.6^\circ C$ bei einer 30 % Reduktion des Wasserflusses.
- Hockey und andere [HOJ82] zeigten mit ihrem Modell beim Hurunui River in Neuseeland (Abfluss um $20 \frac{m^3}{s}$) nach 32 km an einem schönen Sommertag eine Erhöhung der Wassertemperatur um $0.1^\circ C$ pro Abnahme des Abflusses um $1 \frac{m^3}{s}$.
- Gu und andere [GMA98] fanden im Central Platte River in Nebraska in den USA (durchschnittlicher Restwasserabfluss $20 \frac{m^3}{s}$, 30% des natürlichen Abfluss) einen asymptotischer Zusammenhang zwischen dem Abfluss und der Temperatur. Bei grossem Abfluss wirken sich Veränderungen nur geringfügig auf die Temperatur aus, unterhalb eines kritischen Abflusses ($30 \frac{m^3}{s}$) nimmt die Temperatur mit abnehmender Wassermenge aber stark zu.
- Meier [Mei02] bestimmte auf einer 20.6 km langen Fließstrecke im Brenno (Tessin) im Sommer eine um bis zu $3.7 (\pm 0.9)^\circ C$ erhöhte Temperatur, verursacht durch die Wasserentnahme für die hydroelektrische Nutzung (Abflussreduktion von 15.5 auf $4.9 \frac{m^3}{s}$). Während einer Kaltwetterperiode im Winter kam er auf eine Temperaturerniedrigung von $1.8 (\pm 0.8)^\circ C$ (Abflussreduktion von 7.6 auf $2.1 \frac{m^3}{s}$).

Die verschiedenen Untersuchungen zeigen alle bei warmen klimatischen Bedingungen eine erhöhte Wassertemperatur durch die Wasserentnahme. Erklären lässt sich dieser Zusammenhang damit, dass das geringere Wasservolumen stärker durch die äusseren, klimatischen Bedingungen beeinflusst wird.

Die Grösse der Temperaturveränderungen ist in allen Fällen unterschiedlich, da sie stark vom Flusstyp und den klimatischen Bedingungen abhängig sind. Die hier zu untersuchenden Bedingungen lassen sich am besten mit denen von Meier vergleichen. Bei der Analyse wird deshalb auf das Wärmemodell von Meier zurückgegriffen.

2.4 Ziele der Arbeit

Im Fall der Rhône interessieren neben der erhöhten Wassertemperatur in den Restwasserstrecken auch die weiteren Auswirkungen der Kraftwerke auf die Rhône. Dabei spielt auch die Rückleitung des hydroelektrisch genutzten Wassers eine wichtige Rolle. Dieses Wasser wird in hohen Lagen aus den Seitenbächen abgezweigt und nach der Turbinierung in der Rhôneebene in die Seitenflüsse oder direkt in die Rhône zurückgeleitet. Da dieses Wasser in den Stollen im Gegensatz zum Wasser in der Restwasserstrecke auf dem Weg ins Tal praktisch nicht erwärmt wird (nur wenig Reibung, kein Austausch mit der Atmosphäre), führt diese Rückleitung zu einer Temperatursenkung bei der Rückführung in das Gewässersystem.

Um zu analysieren, welcher der beiden Effekte überwiegt, werden ausgewählte Seitenflüsse genauer untersucht und das Temperaturregime mit Messungen über die ganze Flusslänge aufgezeichnet. Um die Differenz gegenüber den hypothetischen natürlichen Bedingungen zu quantifizieren, wird das Computermodell von Meier [Mei02] angewendet. Mit dem Modell sollen die erhobenen Temperaturmessdaten möglichst genau simuliert werden. Um die Aussagekraft des Modells bei verschiedenen Abflussverhältnissen zu testen, werden beeinflusste Situationen (kleiner Abfluss) und unbeeinflusste Situationen (grosser Abfluss) auf dem gleichen Flussabschnitte modelliert.

Wenn das Modell in der Lage ist, die aktuelle Situation bei tiefem und hohem Abfluss befriedigend zu beschreiben, wird es so verändert, dass mit ihm ein hypothetischer Zustand des Flusses vor der Kraftwerknutzung nachgebildet werden kann. Aus dem Vergleich zwischen den Resultaten des Modells des aktuellen Zustands und den Resultaten des Modells des hypothetischen Zustands (ohne Kraftwerke) wird auf den Einfluss der Kraftwerke auf den Temperaturhaushalt der Gewässer geschlossen.

Nach Möglichkeit sollen die gewonnenen Erkenntnisse auf die anderen hydraulisch genutzten Seitenbäche übertragen werden. Durch eine grobe Abschätzung soll damit der Einfluss aller hydroelektrisch genutzten Seitenflüsse auf das Temperaturregime der Rhône abgeschätzt werden.

Kapitel 3

Untersuchungsgebiete

Die Rhône entspringt am Rhônegletscher oberhalb von Gletsch. Sie durchfließt danach das Wallis von Osten nach Westen über eine Länge von 160 km, bis sie schliesslich in den Genfersee mündet. Ihr Einzugsgebiet beträgt in diesem Lauf 5200 km². Diese Untersuchung konzentriert sich auf die seitlichen Zuflüsse in der Rhôneebene von Brig bis Martigny.

Gemäss der Karte über die Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz [BWG01] (Abbildung 3.1) ist ersichtlich, dass fast alle seitlichen Zuflüsse der Rhône durch die hydroelektrische Energieproduktion beeinflusst sind. Bei allen grösseren Seitenflüssen wird in den höhern Lagen Wasser abgezweigt, hydroelektrisch genutzt und in tieferen Lagen wieder dazugeleitet. In den dazwischen liegenden Flussstrecken ist die Restwasser-Abflussmenge gegenüber dem natürlichen Abfluss stark reduziert.

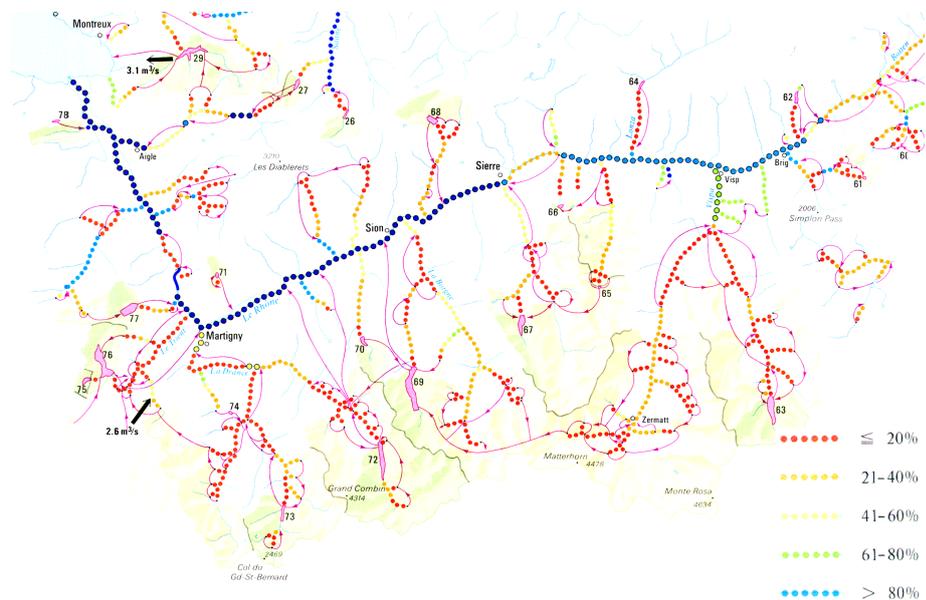


Abbildung 3.1: Ausschnitt aus der Karte über die Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz [BWG01].

Als Beispiele werden in dieser Arbeit die beiden Zuflüsse Borgne und Lonza genauer untersucht. Die Lonza repräsentiert dabei einen nördlichen Zufluss im oberen, die Borgne einen südlichen Zufluss im unteren Teil des Wallis.

3.1 Lonza

Das Lötschental verläuft in nordöstlicher Richtung und ist zwischen den Bergketten der Berner und Walliser Alpen eingebettet und erstreckt sich von Goppenstein bis zum Langgletscher. Dort am oberen Ende des Tals entspringt die Lonza als Ausfluss des Gletschers auf über 2000 *m* Höhe.

Danach fliesst die Lonza über eine Strecke von 14 *km* ohne grössere Eingriffe bis zum Staubecken in Ferden, wo das Wasser gespeichert wird. Aus dem Stausee wird Wasser dem Kraftwerk in Gampel für die Energieproduktion zugeteilt. Das restliche Wasser fliesst im natürlichen Flussbett durch ein enges, steiles, 7.5 *km* langes Tal bis nach Gampel. Die Restwassermenge beträgt im Sommer 100 *l/s*, im Winter wird kein Restwasser dotiert. Unterhalb des Kraftwerks in Gampel erfolgt die Rückleitung des abgezweigten Wassers. Die letzten 1.7 *km* von der Rückleitung bis zum Einfluss in die Rhône sind flach und kanalisiert (Karte Abbildung 3.2).

3.2 Borgne

Die Borgne entspringt in der südlichen Alpenkette des Wallis im Val d'Hérens.

Am oberen Ende ist die Borgne in zwei Seitenarme gegabelt (Kartenausschnitt der Borgne in der Abbildung 3.3). Der eine Seitenarm, die Borgne d'Arolla entspringt aus dem Gletscher um den Mont Collon, der andere Seitenarm, die Borgne de Ferpècle aus dem Gletscher um den Mont Mini. Der Zusammenfluss dieser zwei Arme erfolgt in les Haudères.

Der grösste Zufluss auf der Fliessstrecke ins Tal ist der Fluss Dixence aus dem Val d'Héremence, welche unterhalb der Pyramiden von Euseigne in die Borgne mündet. Die Mündung in die Rhône liegt bei Bramois, kurz vor Sion.

Die Borgne wird in vielfältiger Weise durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst. In den hohen Lagen wird das Wasser der Borgne und von den umliegenden Seitenflanken in Wasserfassungen gesammelt und in den Stausee Lac des Dix in das Tal Val d'Héremence gepumpt. Bei der Borgne de Ferpècle hat es am oberen Ende eine kleine Staumauer (Volumen 0.1 Mio *m*³); das Wasser daraus wird ebenfalls in den grossen Stausee Lac des Dix gepumpt.

Durch die seitlichen Zuflüsse in den tieferen Lagen wird der Abfluss der Borgne im Verlauf der Fliessstrecke kontinuierlich wieder erhöht. Unterhalb von La Lvette wird die Borgne noch einmal aufgestaut und Wasser abgezweigt.

In Bramois befindet sich das Kraftwerk, welches das in La Lvette gefasste Wasser in die Borgne zurückleitet. Das Wasser aus dem Lac de Dix wird nach der Nutzung direkt in die Rhône geleitet.

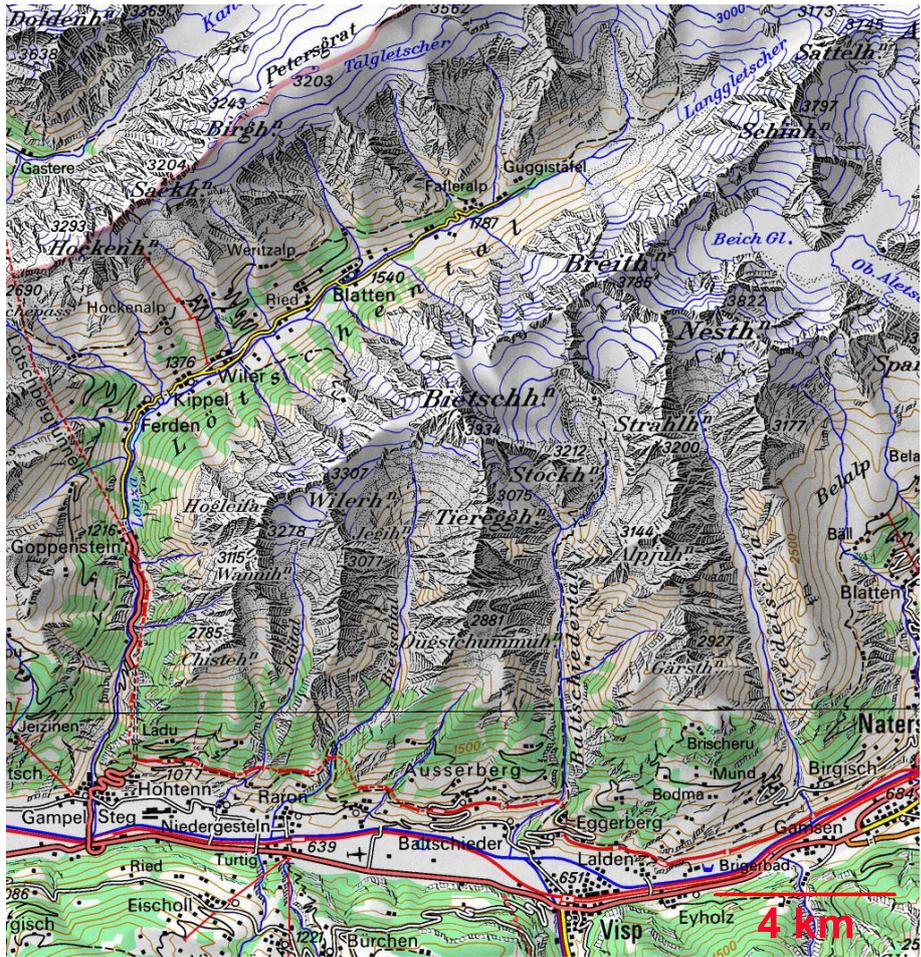


Abbildung 3.2: Kartenausschnitt des Lötschental aus der Schweizerischen Landeskarte.

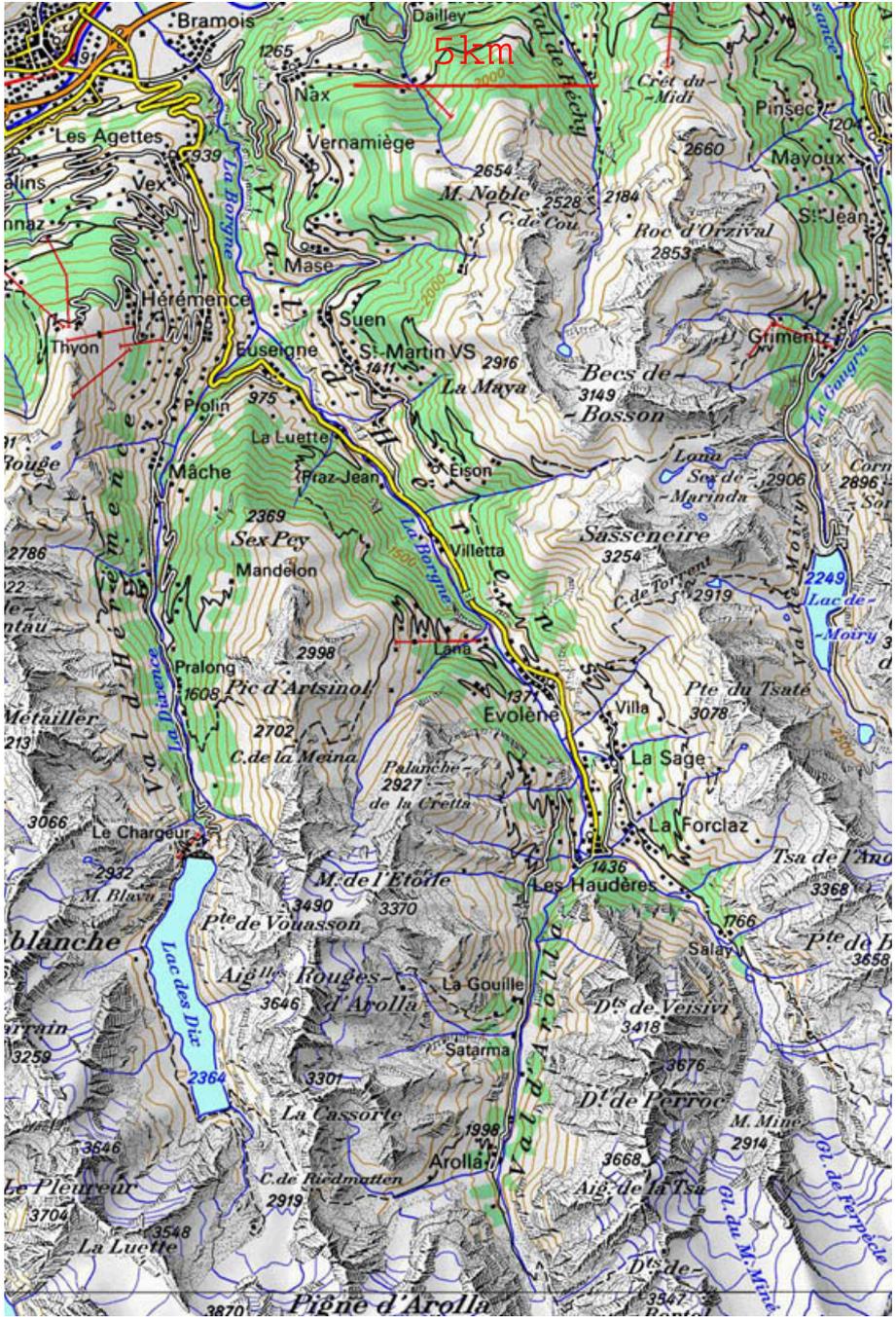


Abbildung 3.3: Kartenausschnitt mit dem Fluss Borgne aus der Schweizerischen Landeskarte.

Kapitel 4

Hydraulikmodell

Um den Wärmehaushalt eines Fließgewässers simulieren zu können, muss zuerst ein hydraulisches Modell des Flusses erstellt werden. Das Modell soll dabei aus den gegebenen Randbedingungen (Gerinnegeometrie und Zuflüsse) den Abfluss, die Fließgeschwindigkeit und den benetzten Querschnitt des Flusses berechnen. Die Grundlagen für das hydraulische Modell wurden aus der Doktorarbeit [Mei02] von Werner Meier übernommen.

Die Modellierung verwendet ein eindimensionales Modell. Das bedeutet, dass alle Zustandsvariablen des Flusses über den Querschnitt gemittelt und die Veränderungen nur in Längsrichtung betrachtet werden. In den untersuchten Bergbächen sind die horizontale und vertikale Durchmischung in der Regel so gross, dass diese Vereinfachung die natürlichen Gegebenheiten gut beschreibt.

Mit einem eindimensionalen Modell ist es möglich, mit geringem rechnerischem Aufwand die Veränderungen über längere Streckenabschnitte zu simulieren.

Die Modellgleichungen werden mit AQUASIM im 2.1 berechnet, einem an der EAWAG entwickelten Computerprogramm [EAW].

4.1 Modellgleichungssystem

Die Grundlagen für die Modellierung liefert die Gleichungen, welche im Programm AQUASIM implementiert sind [Rei98b].

4.1.1 Gleichungssystem von St. Venant

Für die hydraulische Modellierung wird das Gleichungssystem von St. Venant verwendet [Yen73]. Es beschreibt in eindimensionaler Näherung den Abfluss in offenen Gerinnen.

Das Gleichungssystem besteht aus der Kontinuitätsgleichung (4.1), welche die Massenerhaltung beschreibt und der Bewegungsgleichung (4.2), die den Einfluss der Gravitations- und Reibungskräfte auf die Flüssigkeit berücksichtigt.

$$\frac{\partial A_{adv}}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} + q_{lat} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_{adv}} \right) - g A_{adv} \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} + S_f \right) \quad (4.2)$$

- t : Zeit [s]
 x : horizontale Koordinate in Fließrichtung des Flusses [m]
 A_{adv} : benetzte Querschnittsfläche [m²]
 Q : Abflussmenge [m³/s]
 q_{lat} : lateraler Zufluss pro Fließlänge [m²/s]
 z_0 : Höhe des Wasserspiegels [m]
 S_f : Fließwiderstand, entspricht dem Verhältnis von Reibungskraft zu Gewichtskraft [-]
 g : Erdbeschleunigung (9.81m/s²)

4.1.2 Transport/Reaktionsgleichung

Diese hydraulischen Gleichungen werden mit der Transport/Reaktionsgleichung für gelöste Substanzen gekoppelt (Gleichung 4.3). Diese Gleichung beschreibt die Veränderung von Substanzen (gelöste Stoffe) und Wassereigenschaften (wie zum Beispiel der Temperatur). Dabei werden die Prozesse Advektion und Längsdispersion, sowie die Umwandlungsreaktionen und Einflüsse lateraler Zuflüsse berücksichtigt.

$$\frac{\partial (A_{adv} C_{adv})}{\partial t} = \underbrace{-\frac{\partial (Q C_{adv})}{\partial x}}_{\text{Advektion}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(A_{adv} E_{adv} \frac{\partial C_{adv}}{\partial x} \right)}_{\text{Längsdispersion}} + \underbrace{A_{adv} r_{adv} C_{adv}}_{\text{Reaktion}} + \underbrace{q_{lat} (C_{lat} - C_{adv})}_{\text{Zuflüsse}} \quad (4.3)$$

- C_{adv} : querschnittsgemittelte Stoffkonzentration [z.B.kg/m³]
 E_{adv} : Dispersionskoeffizient [m²/s]
 r_{adv} : Netto-Reaktionsrate [s⁻¹]
 C_{lat} : Stoffkonzentration des lateralen Zuflusses [z.B.kg/m³]

4.1.3 Totzonenmodell

Natürliche Fließgewässer werden durch die eindimensionale Advektions-Dispersions-Gleichung nicht optimal beschrieben, da sich in ihnen durch unregelmäßige Ufer- und Sohlenberandungen sogenannte Totzonen (Stillwasser oder Pools) ausbilden. Totzonen sind Bereiche im Fluss, in welchen sich das Wasser nur wenig oder gar nicht in Flussrichtung bewegt (in Wirbelzonen sind auch Bewegungen gegen die Fließrichtung möglich). Diese Zonen sind mit dem fließenden Fluss teil hydraulisch verbunden. Durch den Austausch mit dem fließenden Fluss teil können gelöste Substanzen oder Wassereigenschaften, wie zum Beispiel gelöste Stoffe, in diesen Bereichen für eine gewisse Zeit zurückgehalten werden, was die longitudinale Dispersion stark erhöhen kann.

In Bergbächen kommen solche Totzonen häufig besonders ausgeprägt zum Vorschein. In der Abbildung 4.1 ist ein Beispiel für eine Totzone abgebildet. Tot-

zonen können sich durch die Form des Bachbettes, hervorstehende Steinblöcke, aber auch Baumstämme oder Zwischenräume in der Gewässersohle bilden.



Abbildung 4.1: Foto einer Bachstrecke mit einer Totzone.

Der Effekt von Totzonen kann durch die Vergrößerung des dimensionslosen Reibungskoeffizienten grob berücksichtigt werden.

Für eine bessere Abbildung der Natur wurden schon verschiedentlich sogenannte Totzonen in ein hydraulisches Modell implementiert [TS70, SN78, BW83]. Auch Meier hat bei seinen Modellierungen Totzonen in sein hydraulisches Modell integriert.

Bei seinem Totzonenmodell wird neben der advektiven Fließzone eine (allenfalls auch mehrere) zusätzliche Totwasserzone nachgebildet. Die Totzone befindet sich parallel zur advektiven Flussstrecke. Das Wasser in der Totzone hat in Flussrichtung keine Geschwindigkeit. Zwischen der advektiven Flusszone und der Totzone besteht ein fortwährender Wasseraustausch. Weiter wird angenommen, dass die Totzone an jeder Stelle vollständig durchmischt ist. Diese Annahmen stellen zwar eine grobe Vereinfachung dar, damit kann der Effekt von Totwasserzonen aber gut nachgebildet werden, ohne dass ein aufwendiges dreidimensionales Modell angewendet werden muss.

Für die mathematische Beschreibung des Totzonenmodells werden die zwei Parameter Querschnittsfläche der Totzone A_{pool} und der Wasseraustausch pro Längeneinheit zwischen der advektiven Zone und dem Totwasser q_{ex}^{pool} benötigt.

Die Transportgleichung 4.3 muss beim Totzonenmodell um einen Term erweitert werden, welcher den Austauschprozess zwischen der advektiven Zone und der Totzone beschreibt. Zusätzlich muss noch eine Gleichung 4.5 für die Veränderung von Substanzen und Wassereigenschaften in der Totzone eingebaut werden. In der Totzone werden nur die Prozesse Reaktion/Umwandlung

und der Austausch mit der advektiven Zone berücksichtigt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (A_{adv} C_{adv})}{\partial t} &= -\frac{\partial (Q C_{adv})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_{adv} E_{adv} \frac{\partial C_{adv}}{\partial x} \right) + A_{adv} r_{adv} C_{adv} \\ &+ q_{lat} (C_{lat} - C_{adv}) + \underbrace{q_{ex}^{pool} (C_{pool} - C_{adv})}_{\text{Totzonenaustausch}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial (A_{pool} C_{pool})}{\partial t} = A_{pool} r_{pool} C_{adv} - q_{ex}^{pool} (C_{pool} - C_{adv}) \quad (4.5)$$

- A_{pool} : Querschnitt der Totzone [m^2]
 q_{ex}^{pool} : Wasseraustausch zwischen advektiver Zone und der Totzone [m^2/s]
 C_{pool} : Stoffkonzentration in der Poolzone [z.B. kg/m^3]
 r_{pool} : Netto-Reaktionsrate in der Poolzone [s^{-1}]

Die Querschnittsfläche wird parametrisiert als Anteil (β) der Totzone an der gesamten Querschnittsfläche A_{tot} des Flusses (Gleichung 4.6).

$$\begin{aligned} A_{pool} &= \beta \cdot A_{tot} \\ A_{tot} &= A_{adv} + A_{pool} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die für das Totzonenmodell benötigten Angaben (q_{ex}^{pool} und β) können nicht direkt im Feld gemessen werden. Sie müssen mittels Tracerversuchen und Parameterschätzungen bestimmt werden. Eine genauere Erklärung folgt im Abschnitt 4.3.

4.2 Verwendete Eingabedaten

Die verwendeten Systemgleichungen 4.1 bis 4.3 setzten sich aus verschiedenen Standort-spezifischen Grössen zusammen. Diese müssen aus Begehungen und Messungen vor Ort direkt oder mit Hilfe von empirischen Schätzformeln bestimmt werden. Die verwendeten Schätzformeln sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

4.2.1 Flussgeometrie

Als eine Randbedingung muss die Flussgeometrie des Baches eingegeben werden. Das heisst, es muss bekannt sein, wie sich die Querschnittsfläche des Flusses bei veränderten Abflussbedingungen verhält. Bei einem grösseren Wasserfluss nimmt die Querschnittsfläche zu. Eine gute Möglichkeit um diesen Zusammenhang abzuschätzen, ist die Verwendung der Trapezform (Formel 4.7 und Abbildung 4.2).

$$\begin{aligned} A_{adv} &= d_{max} (w_{bed} + d_{max} \tan(\alpha)) \\ d_{max} &: \text{maximale Wassertiefe } [m] \\ w_{bed} &: \text{Breite des Bachbetts am Grund } [m] \\ \alpha &: \text{Neigung des Ufers (Böschungswinkel) } [-] \end{aligned} \quad (4.7)$$

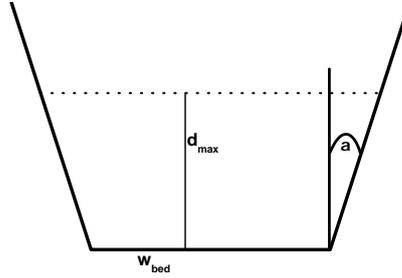


Abbildung 4.2: Trapezprofil

Aus einer gegebenen Wassertiefe d_{max} lässt sich daraus die Querschnittfläche A_{adv} berechnen. Die Flusseigenschaften Breite des Bachbetts w_{bed} und der Böschungswinkel α müssen im Feld gemessen oder abgeschätzt werden.

Aus diesem Zusammenhang lassen sich auch der benetzte Umfang (P in der Gleichung 4.8) und die Flussbreite an der Oberfläche (w in der Gleichung 4.9) bestimmen.

$$P = w_{bed} + \frac{2d_{max}}{\cos\alpha} \quad (4.8)$$

$$w = w_{bed} + 2d_{max} \tan(\alpha) \quad (4.9)$$

4.2.2 Fließwiderstand

Für die Abschätzung des Fließwiderstandes S_f können die Schätzformeln von Manning (Formel 4.10) oder von Darcy-Weisbach (Formel 4.11) verwendet werden (in dieser Arbeit wird die Formel von Darcy-Weisbach verwendet).

$$S_f = n^2 \frac{1}{R^{\frac{4}{3}} A_{adv}^2} Q^2 \quad (4.10)$$

$$S_f = \frac{f}{8g} \frac{1}{R} \frac{Q^2}{A_{adv}^2} \quad (4.11)$$

n : Manning Reibungskoeffizient $\left[s/m^{\frac{1}{3}} \right]$

R : hydraulischer Radius $\left(R = \frac{A_{adv}}{P} \right) [m]$

P : benetzter Umfang $[m]$

f : Darcy-Weisbach Reibungskoeffizient $[-]$

Um diese Formeln anzuwenden, muss der Reibungskoeffizient n oder f bestimmt werden. Rice, Kadavy und Robinson haben verschiedene Formeln zur Bestimmung dieser Koeffizienten in steilen, grobkörnigen Bergbächen untersucht [RKR98].

Die meisten Formeln zur Schätzung dieser Parameter beruhen auf Feldmessungen der Korngrößenverteilung im Bachbett. Bei der Korngrößenanalyse wird stichprobenartig die Verteilung der mittleren Steindurchmesser im Bachbett erfasst.

Für steinige Bergbäche mit einem mittleren (Median) Steindurchmesser von 52 bis 278 *mm* und einem Gefälle von 2.8 bis 33.3%, empfehlen Rice, Kadavy und Robinson die Formel 4.12 respektive 4.13 zu verwenden. Diese Bedingungen werden von den in dieser Arbeit untersuchten Flussabschnitten erfüllt, so dass diese Formeln verwendet werden.

$$n = 0.029 (1000D_{50}S_0)^{0.147} \quad (4.12)$$

$$f = \frac{8}{\left(5.1 \lg_{10} \left(\frac{d}{D_{84}}\right) + 6\right)^2} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} D_{50} \text{ bzw. } D_{84} &: 50\% (84\%) \text{ der gemessenen Steine sind kleiner als der} \\ &\text{angegebene Wert (in Meter) [-]} \\ S_0 &: \text{Gefälle des Bachbetts [-]} \\ d &: \text{mittlere Wassertiefe [m]} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Die grosse Anzahl der von Rice, Kadavy und Robinson untersuchten Formeln zeigt die grosse Unsicherheit bei der Abschätzung des Reibungskoeffizienten. Der mögliche Fehler ist bei allen vorgeschlagen Formeln relativ gross.

Auf Grund des hohen Wasserpegels kann nicht in allen Flussabschnitten eine Korngrössenanalyse bestimmt werden. In diesem Fall kann der Reibungskoeffizient mit Hilfe eines Tracerversuchs abgeschätzt werden. Dabei wird der Reibungskoeffizient so gewählt, dass die Simulation den Tracerversuch möglichst gut nachbildet. Der Nachteil bei der Parameterschätzung ist, dass bei der Schätzung des Parameters f zusammen mit den Parametern für das Totzonenmodell (A_{pool} und q_{ex}^{pool}) Identifizierbarkeitsprobleme auftreten können, da beide einen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit der Stoffe haben. Deshalb wird in dieser Arbeit für Flussabschnitte in welchen f nicht direkt bestimmt werden kann, auf die Einführung einer Totzone verzichtet. Genauere Erklärungen sind in der Arbeit von Meier [Mei02] zu finden.

4.2.3 Dispersion

Als Schätzformel für die Längsdispersion wird von Fischer [Fis75] folgende Beziehung vorgeschlagen (4.15).

$$E_{adv} = c_f \frac{w^2 \frac{Q^2}{A_{adv}^3}}{u^* d} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} c_f &: \text{Dispersionskoeffizient (nach Fischer: 0.011)} \\ w &: \text{benetzte Breite [m]} \\ u^* &: \text{Schubspannungsgeschwindigkeit (vergleiche Formel 4.16) [m/s]} \\ d &: \text{mittlere Wassertiefe [m]} \end{aligned}$$

Die Schubspannungsgeschwindigkeit und die mittlere Wassertiefe lassen sich mit der Formel 4.16 bzw. 4.17 berechnen.

$$u^* = (gRS_0)^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}
S_0 & : \text{ Gefälle des Fließgewässer [-]} \\
d & = \frac{A_{adv}}{w}
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

Da die Formel von Fischer durch Messungen in einem Laborkanal bestimmt wurde, werden darin Totzoneneffekte gar nicht berücksichtigt. Eine Möglichkeit, diese Effekte grob in die Berechnungen einzubeziehen, ist die Vergrößerung des dimensionslosen Reibungskoeffizienten c_f . Dieser Parameter kann auch zusammen mit dem Reibungskoeffizient f ohne Identifizierbarkeitsprobleme mittels einer Parameterschätzung eruiert werden.

In dieser Arbeit wird für die Modellierungen ohne Totzone eine andere Dispersionsformel verwendet. Aufbauend auf die Formel von Fischer haben Koussis und Rodríguez-Mirasol durch Feldmessungen eine besser an die natürlichen Daten angepasste Dispersionsformel entwickelt [KRM98]. In der Formel 4.18 sind die Totzoneneffekte zwar nicht explizit einbezogen, aber durch die Feldkalibrierung der Formel implizit berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
E_{adv} & = \phi \frac{\sqrt{gRS_0}w^2}{d} \\
\phi & : \text{ Dispersionsfaktor (nach von Koussis und Rodríguez-Mirasol: 0.6)}
\end{aligned}
\tag{4.18}$$

ϕ kann durch Tracermessungen im Feld angepasst werden.

4.3 Tracerversuch

Mit Tracerversuchen kann das hydraulische Modell geeicht und unbekannte Parameter können ans Modell angepasst werden.

Bei einem Tracerversuch wird eine genau bestimmte Menge eines Stoffes, im vorliegenden Fall Kochsalz (Natriumchlorid) als einmaliger Input in den Fluss gekippt. Nach einer Distanz, in welcher der Stoff gleichmässig über den Flussquerschnitt verteilt wurde, misst ein Sensor die Konzentration des Stoffs im Wasser und zeichnet sie auf.

Bei einem konservativen Tracer (ein Stoff der im Wasser nicht abgebaut wird), kann man aus dem Integral der erhaltenen Durchgangskurve die Abflussmenge des Flusses bestimmen. Bei einem hohen Abfluss verteilt sich der Stoff auf eine grössere Wassermenge, die gemessene Konzentration wird kleiner. Bei einem kleinen Abfluss verteilt sich der Stoff in einer kleineren Wassermenge, die gemessene Konzentration wird grösser.

Wenn die Distanz von der Einleitstelle bis zum Messpunkt genau gemessen wird, kann die gemessene Tracerkurve zur Eichung des Modells und Parameterschätzung verwendet werden. Dabei wird mit dem hydraulischen Modell (aufgebaut auf den Geometriedaten Breite, Länge, Böschungswinkel und Gefälle) die Tracerstrecke nachgebildet und der Tracerinput simuliert. Mit der Transport/Reaktionsgleichung kann das Modell daraus das Verhalten des Stoffes im Wasser nachbilden. Wird der eingebrachte Stoff im Wasser abgebaut, muss noch eine Abbaurate ins Modell eingeführt werden. Die simulierte Stoffkonzentration sollte nun am Ort der Tracermessung mit der gemessenen Tracerkurve übereinstimmen.

Bei allfälligen Ungereimtheiten können die unsicheren Parameter des Modells so verändert werden, dass die simulierte und die gemessene Tracerkurve möglichst gut übereinstimmen.

Bei den Flussabschnitten mit einer Totzone wurden in dieser Arbeit die Fläche A_{pool} der Totzone und der Austausch q_{ex}^{pool} zwischen der advektiven Zone und der Totzone abgeschätzt. Der Reibungskoeffizient f wurde in diesem Fall mit der Schätzformel (Formel 4.13) aus der Korngrössenanalyse bestimmt und für die Dispersion wurde die Formel von Fischer verwendet.

Bei den Flussabschnitten ohne Totzone, wo keine Korngrössenanalyse durchgeführt werden konnte, wurden mit den Tracermessungen der Reibungskoeffizient f und der Dispersionsfaktor ϕ für die Dispersionsformel von Koussis und Rodríguez-Mirasol [KRM98] abgeschätzt.

Optimal ist es, wenn Tracerversuche bei unterschiedlichen Abflussmengen durchgeführt werden können, denn damit lässt sich die Abhängigkeit der geschätzten Parameter vom Abfluss bestimmen.

Um die Parameterschätzung möglichst gut durchzuführen, stellt AQUASIM ein wirkungsvolles Werkzeug zu Verfügung, das die Abweichungen von den gemessenen $y_{m,i}$ zu den simulierten Werten $y_{s,i}$ minimiert. Dabei wird die Summe χ der quadrierten Differenzen zwischen den gemessenen Werten $y_{m,i}$ und den simulierten Resultaten $y_{s,i}$, gewichtet mit der Standardabweichung $\sigma_{s,i}$, minimiert (Formel 4.19).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{m,i} - y_{s,i}}{\sigma_{s,i}} \right)^2 \quad (4.19)$$

4.3.1 Übertragung auf die ganze Strecke

Tracerversuche können in der Regel nicht über die ganze Untersuchungsstrecke durchgeführt werden, weil dazu ein viel zu grosser Tracereintrag nötig wäre. Tracerversuche an vielen Stellen durchzuführen, ist mit einem grossen Aufwand verbunden.

Die Resultate der Tracerversuche werden deshalb auch für Abschnitte verwendet, in welchen die Werte nicht evaluiert wurden. Die Schwierigkeit bei Bergbächen besteht darin, dass die Eigenschaften des Bachbettes mit dem Flussverlauf stark variieren. Die bei einem Tracerversuch ermittelten Werte können schon kurz nach der Tracerstrecke stark ändern. Um Abschätzungen durchführen zu können, werden deshalb Abschnitte mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst.

Kapitel 5

Wärmehaushaltsmodell

Die Grundlagen des Wärmehaushaltsmodells wurden aus den Arbeiten von Meier [Mei02] und Bonjour [Bon98] übernommen. Es beschreibt die Energieflüsse zwischen der Umgebung (Atmosphäre und Sediment) und dem Fließgewässer.

Als Grundlage für das Wärmehaushaltsmodell dient das im Kapitel 4 geeichte hydraulische Transportmodell. Das Verhalten der Temperatur (Transport und Mischung) in Längsrichtung wird darin mit der angepassten Transport/Reaktionsgleichung aus dem Kapitel 4 modelliert. Wenn das hydraulische Modell um eine Totzone erweitert wird, kann diese auch im Wärmehaushaltsmodell verwendet werden. Dazu ist eine zusätzliche Gleichung für die Temperatur in der Poolzone nötig.

Beim Wärmehaushalt wird zusätzlich das Kompartiment Sediment berücksichtigt. Der Wärmeaustausch mit dem Sediment ist insbesondere für die Modellierung des Temperaturtagesgangs sehr wichtig [SS93]. Das Sediment hat dabei in der Regel eine dämpfende Wirkung auf die Temperatur im Fluss. Während des Tages nimmt das Sediment Wärme vom Wasser des Flusses auf und in der Nacht gibt es die Wärme wieder an den Fluss zurück.

Die Wechselwirkung mit dem Sediment wird in diesem Modell als reiner Wärmeaustausch ohne Wassertransport (Versickern, Aufnahme von Grundwasser) nachgebildet.

Da das hydraulische Modell eindimensional ist, wird die Temperatur über den ganzen Querschnitt des Flusses gemittelt. Wegen der turbulenten Verhältnisse mit der daraus resultierenden guten Durchmischung in Gebirgsflüssen ist diese Vereinfachung gerechtfertigt. Temperaturdifferenzen in horizontaler und vertikaler Richtung werden über eine kurze Flussstrecke ausgeglichen, so dass das hydraulische Modell gut geeignet ist, um Wärmeaustauschprozesse eines Flusses über eine längere Distanz zu beschreiben.

5.1 Wärmebilanzgleichungen

Für die drei Kompartimente advektiver Fluss, Totzone und Sediment wird je eine separate Wärmebilanzgleichung aufgestellt. Diese Gleichungen basieren auf den Transport-Reaktionsgleichungen aus dem Kapitel 4.

Die Gleichung 5.1 stellt die Wärmebilanz für die advektive Zone mit allen für diese Zone wichtigen Prozessen dar: Advektion, Diffusion, Zuflüsse, Austausch

mit dem Sediment, Austausch mit der Totzone und die Wärmequellen bzw. -senken.

Bei der Wärmebilanz der Totzone (Gleichung 5.2) werden die Terme für die Advektion, die Diffusion (Annahme: die Totzone ist vollständig durchmischt), den Austausch mit dem Sediment und die Zuflüsse nicht benötigt. Der Wärmeaustausch des Sediments findet zwar mit dem advektiven Teil des Flusses und der Totzone statt. Da der Austausch zwischen dem Sediment und dem Wasser viel langsamer abläuft als der Austausch zwischen dem Fluss und den Totzonen, kann einfachheitshalber der gesamte Austausch über die advektive Zone modelliert werden. Der Wärmeaustausch der Totzone mit dem Sediment findet so indirekt über die advektive Zone statt. Auf die Aussagekraft des Modells hat dies keine Auswirkung.

Die Wärmebilanz des Sediments (Gleichung 5.3) umfasst so die Prozesse Austausch mit der advektiven Zone und die Wärmequellen bzw. -senken.

Da die Temperaturveränderung über eine bestimmte Fließstrecke von Interesse ist, werden die Wärmebilanzgleichungen als zeitliche Änderung des Wärmeinhalts des Flusses pro Längeneinheit beschrieben. Die externen Energiequellen und -senken H werden als Wärmeinputs pro Quadratmeter angegeben (Einheiten W/m^2).

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial (A_{adv} T_{adv})}{\partial t} = & - \underbrace{\rho c_p \frac{\partial (Q T_{adv})}{\partial x}}_{\text{Advektion}} + \underbrace{\rho c_p \frac{\partial}{\partial x} \left(A_{adv} E_{adv} \frac{\partial T_{adv}}{\partial x} \right)}_{\text{Diffusion}} \\ & + \underbrace{\rho c_p q_{lat} T_{lat}}_{\text{Zuflüsse}} + \underbrace{w K (T_{sed} - T_{adv})}_{\text{Austausch mit Sediment}} \\ & + \underbrace{\rho c_p q_{ex}^{pool} (T_{pool} - T_{adv})}_{\text{Austausch mit Totzone}} + \underbrace{w H_{adv}}_{\text{Quelle/Senke}} \quad (5.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial (A_{pool} T_{pool})}{\partial t} = & - \underbrace{\rho c_p q_{ex}^{pool} (T_{pool} - T_{adv})}_{\text{Austausch mit advektiver Zone}} + \underbrace{w H_{pool}}_{\text{Quelle/Senke}} \quad (5.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{sed} c_{p_{sed}} \frac{\partial (A_{sed} T_{sed})}{\partial t} = & - \underbrace{w K (T_{sed} - T_{adv})}_{\text{Austausch mit advektiver Zone}} + \underbrace{w H_{sed}}_{\text{Quelle/Senke}} \quad (5.3) \end{aligned}$$

- ρ : Dichte des Wassers [1000 kg/m^3]
- ρ_{sed} : Dichte des Sedimentmaterials [kg/m^3]
- c_p : Wärmekapazität von Wasser [4180 J/(kgK)]
- $c_{p_{sed}}$: Wärmekapazität des Sediments [J/(kgK)]
- T_{adv} : Temperatur in der advektiven Zone [K]
- T_{pool} : Temperatur in der Totzone [K]
- T_{sed} : Temperatur in der Sedimentzone [K]
- T_{lat} : Temperatur der lateralen Zuflüsse [K]

- A_{sed} : benetzte Querschnittsfläche der Sedimentzone [m^2]
- K : Wärmeaustauschkoeffizient Wasser/Sediment [$W/m^2/K$]
- H_{adv} : Wärmequellen bzw. -senken in der advektiven Zone [W/m^2]
- H_{pool} : Wärmequellen bzw. -senken in der Totzone [W/m^2]
- H_{sed} : Wärmequellen bzw. -senken in der Sedimentzone [W/m^2]

Die für die Anwendung der Gleichungen nötigen Parameter A_{adv} , A_{pool} , Q , E_{adv} , q_{lat} , w , q_{ex}^{pool} und A_{pool} werden aus dem hydraulischen Modell aus dem Kapitel 4 übernommen.

Bei Modellen ohne Totzone entfällt die Gleichung 5.2 und somit auch der Austauschprozess zwischen dem advektiven Fluss und der Totzone.

5.1.1 Sedimentparameter

Da zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten des Sediments keine direkten Messungen durchgeführt werden konnten, müssen diese Parameter mit Hilfe der Temperaturmessungen abgeschätzt werden. Dazu werden Parameter A_{sed} , ρ_{sed} und $c_{p_{sed}}$ der Sedimentzone zum Wert k [$J/(m^2K)$] zusammengefasst (Formel 5.4). Zur Normierung werden die Eigenschaften noch durch die Flussbreite w geteilt.

$$k = \frac{A_{sed}\rho_{sed}c_{p_{sed}}}{w} \quad (5.4)$$

Ebenfalls schwierig zu bestimmen ist der Wärmeaustauschkoeffizient K zwischen dem Sediment und der Wasserzone. Die Wärmeleitfähigkeit in einem Boden hängt nicht nur von den mengenmässigen Anteilen der verschiedenen Stoffkomponenten, sondern auch stark von deren räumlich-geometrischen Verteilung ab [FR00]. Dieser Koeffizient muss deshalb ebenfalls aus den Temperaturdaten geschätzt werden.

5.1.2 Temperatur der Zuflüsse

Zuflüsse mit bekannter Zuflusstemperatur T_{lat} können in der Simulation als punktförmige Inputs modelliert werden. Für die Temperatur der Zuflüsse ohne Messung wird angenommen, dass sie ungefähr der Temperatur des Flusses an der Stelle bei der Einmündung entspricht. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass ein starker Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur in den Schweizer Flüssen und der Messhöhe besteht. Wenn der Anteil der Zuflüsse am Gesamtabfluss hoch ist, kann sich aber diese Vereinfachung als zu ungenau erweisen.

5.2 Energieflüsse

Die Wärmequellen und -senken setzen sich aus denjenigen Prozessen zusammen, die im jeweiligen Kompartiment aktiv sind.

Das Modell beinhaltet die für Gewässer relevanten Energieflüsse: Kurzwellige Strahlung H_S , langwellige Einstrahlung H_L , langwellige Ausstrahlung H_W , Verdunstung H_V und Konvektion H_C , sowie die Reibungswärme H_F (Abbildung 5.1).

Energieflüsse

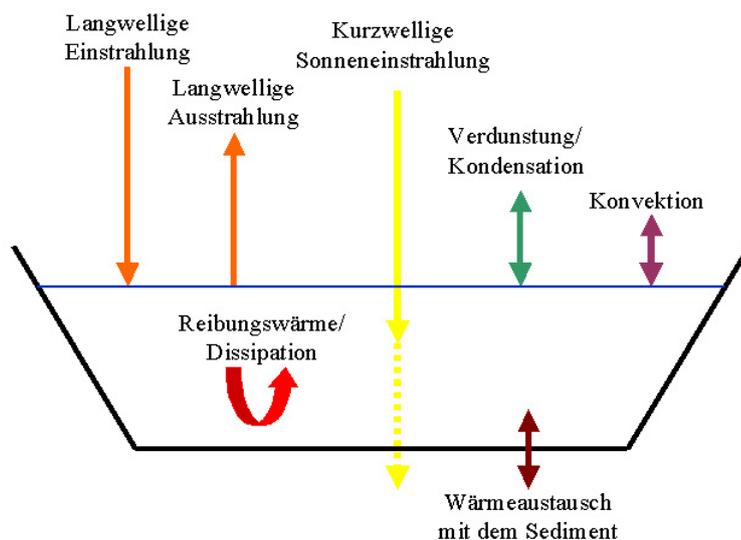


Abbildung 5.1: Energieflüsse, welche das Wärmeregime in Bergbächen bestimmen.

Die langwellige Ein- und Ausstrahlung, die Verdunstung und die Konvektion finden über die Wasseroberfläche statt. Die Breite der Wasseroberfläche spielt deshalb eine wichtige Rolle. Bei der Modellierung wird die im Feld gemessene Breite an die Flussbreite der advektiven Zone angepasst. Die Austauschprozesse mit der Atmosphäre laufen deshalb alle über das Kompartiment des advektiven Flusses ab. Bezüglich der Lage der Totzone macht das Modell keine Aussage. Um die realistische Flussbreite zu modellieren, wird die Totzone deshalb nicht benötigt.

Bei der Modellierung des Wärmehaushalts kann der gesamte Wärmeaustausch über die advektive Zone eingegeben werden. Die Totzone partizipiert indirekt an den Wärmeveränderungen durch den Austausch mit der advektiven Zone. Da dieser Austausch relativ schnell stattfindet, passt sich die Temperatur der Totzone rasch an Veränderungen in der advektiven Zone an und befindet sich schnell mit dieser im Gleichgewicht.

In Bächen mit geringen Wassertiefen ist es möglich, dass ein Teil der kurzwelligen Strahlung die ganze Wasserschicht durchdringt und bis zum Grund gelangt. Die Strahlen erwärmen dort das Sedimentkompartiment des Flusses. Der Anteil der Strahlen, welche das Sediment erreicht, wird f_s genannt.

Der letzte Wärmefluss, die Dissipation, tritt nur in der advektiven Zone auf,

weil das Wasser in den anderen Kompartimenten ohne makroskopische Strömung betrachtet wird.

$$H_{adv} = (1 - f_s) H_s + H_L + H_W + H_V + H_C + H_F \quad (5.5)$$

$$H_{pool} = 0 \quad (5.6)$$

$$H_{sed} = f_s H_s \quad (5.7)$$

In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die einzelnen Energieflüsse eingegangen und ihre Nachbildung im Modell beschrieben.

5.3 Kurzwellige Strahlung

Bei diesem Energiefluss handelt es sich um die Wassererwärmung durch die direkte kurzwellige Sonneneinstrahlung.

Der Energieeintrag der Sonnenstrahlung findet über die Wasseroberfläche statt. Je grösser die Wasseroberfläche, umso mehr Sonnenstrahlung kann in das Gewässer eindringen.

Dabei darf aber nur die tatsächlich bestrahlte Wasserfläche berücksichtigt werden. Bei Flüssen ist häufig ein Teil der Wasseroberfläche durch die Vegetation oder das Relief beschattet, dieser Anteil muss von der Einstrahlung abgezogen werden. Ein Teil der eingestrahelten Energie wird zudem an der Wasseroberfläche reflektiert. Unter Einbezug dieser Komponenten wird der Energiefluss mit der Formel 5.8 abgeschätzt.

$$H_S = (1 - k_s)(1 - r_s) H_S^g \quad (5.8)$$

H_S^g : an der Erdoberfläche gemessene global Strahlung [W/m^2]

k_s : Anteil der durch die Ufervegetation und das Relief beschattete
Flussoberfläche [-]

r_s : von der Wasseroberfläche reflektierter Anteil [-]

Die Beschattung ist von der Jahres- und Tageszeit abhängig, im Modell wird jedoch nur ein mittlerer Wert verwendet. Bei den Feldbegehungen kann der mittlere Wert grob abgeschätzt werden. Für die genauere Bestimmung werden Temperaturmessungen für eine Parameterschätzung verwendet. Bei der Modellierung im Winter muss die Beschattung neu geschätzt werden.

5.3.1 Reflexion

Die Reflexion an der Wasseroberfläche ist vom Einstrahlungswinkel der Sonne abhängig. Zur Abschätzung des Reflexionskoeffizienten r_s wird die Gleichung 5.9 von Anderson [And54] verwendet.

$$r_s = a\varphi^b \quad (5.9)$$

φ : Sonnenwinkel (Höhenwinkel) [-]

a : empirischer Parameter [-]

b : empirischer Parameter [-]

Die empirischen Parameter a und b sind in der ursprünglichen Gleichung von Anderson [And54] von der Bewölkung und der Wolkenhöhe abhängig. Da die Wolkenhöhe bei herkömmlichen Wettermessungen nicht erfasst wird, wurden die Werte so gemittelt, dass die Grösse der Parameter mit dem Anteil der Bewölkung am Himmel (C) abgeschätzt werden kann (Tabelle 5.1).

Bewölkungsanteil C	0	0.1-0.5	0.6-0.9	1
a	1.18	2.19	0.96	0.36
b	-0.77	-0.97	-0.68	-0.44

Tabelle 5.1: Abhängigkeit der Parameter von der Bewölkung (Original nach Brown und Barnwell [BB87]).

Der Sonnenwinkel gibt den Winkel zwischen der Horizontalen (dem Boden) und der Sonne an. Die Grösse des Winkels ist abhängig vom geographischen Ort, der Tageszeit und dem Kalenderdatum. Er kann aus trigonometrischen Beziehungen zu jeder Zeit für jeden Punkt auf der Erde berechnet werden. Die bei der Modellierung verwendete Formel 5.10 stammt von Thomas Brock [Bro81].

$$\sin(\varphi) = \sin(D) \sin(LA) + \cos(D) \cos(LA) \cos(W) \quad (5.10)$$

$$D = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (5.11)$$

$$W = \left(\left(T + \frac{4}{60} (LO - LZ) \right) - 12 \right) 15 \quad (5.12)$$

- D : solarer Deklinationswinkel (vergleiche Formel 5.11) [*Grad*]
- LA : geografische Breite [*Grad*]
- W : Stundenwinkel für die wahre Ortszeit (Formel 5.12) [*Grad*]
- N : Anzahl Tage nach dem 1. Januar [–]
- T : Anzahl Stunden nach Mitternacht (in Normalzeit) [–]
- LO : geografische Länge [*Grad*]
- LZ : geografische Länge der Zeitzone [*Grad*]

5.3.2 Sonneneinstrahlung

In der Arbeit von Meier [Mei02] wurde zur Bestimmung der kurzwelligen Strahlung vor Ort spezielle Messungen durchgeführt. In dieser Arbeit beschränkte man sich auf Daten der meteorologischen Anstalt der Schweiz (MeteoSchweiz [Met]).

Die MeteoSchweiz hat ein Messnetz von Klimastationen über die ganze Schweiz verteilt. An den einzelnen Stationen werden verschiedene meteorologische Parameter erfasst, darunter auch die Globalstrahlung (nicht bei allen Messstationen). Die Globalstrahlung beinhaltet die Einstrahlung im Wellenlängenbereich von 0.3 bis $3\mu m$, bei Meier [Mei02] wird die Strahlung von 0.14 bis $4\mu m$ berücksichtigt. Da die Solarstrahlung unterhalb von 0.3 und oberhalb von $3\mu m$ sehr klein ist, spielt der etwas unterschiedliche Messbereich keine Rolle.

Da sich die Messstationen in der Regel nicht direkt neben dem zu modellierenden Fluss befinden, wurde die Übertragbarkeit der Messwerte geprüft.

Die globale Strahlung ist von der Sonnenhöhe, der Wolkenmenge, der Transparenz der Atmosphäre und der Höhe der Messstation abhängig. Die Sonnenhöhe, der Bewölkungsanteil und die Transparenz der Atmosphäre sind beim zu modellierenden Fluss und einer nahe gelegenen Meteostation in etwa gleich. Die Höhenabhängigkeit der Strahlungsverteilung in den Schweizer Alpen wurde von Marty und andern [MPFO02] in einer gross angelegten Messkampagne untersucht.

Bei dieser Studie wurde eine signifikante Höhenabhängigkeit der Strahlung bestätigt. Im Jahresmittel nimmt die globale Strahlung um 1.3 W/m^2 pro 100 m Höhenunterschied zu, wobei der Gradient von der Jahreszeit und den Wetterverhältnissen abhängt.

Um diesen Erkenntnissen Rechnung zu tragen, wird die Sonnenstrahlung entlang der Fließstrecke in Abhängigkeit der Höhe modelliert. Am besten wird dazu der Gradient von zwei Messstationen in der Nähe des Untersuchungsgebiets verwendet.

Die Sonneneinstrahlung könnte auch über die Wolkenbedeckung abgeschätzt werden. Dazu wird die Sonneneinstrahlung ausserhalb der Atmosphäre berechnet (für jeden Ort und Zeit berechenbar). Die Abschwächung der Strahlung in der Atmosphäre (Transmission) kann danach über den Bewölkungsgrad abgeschätzt werden. Da die Aufzeichnung des Bewölkungsgrads nur grob erfolgt (in 20% Schritten) und während der Nacht keine Aufnahmen gemacht werden, ist die Auflösung bei dieser Methode geringer.

5.4 Langwellige Einstrahlung

Die langwellige Einstrahlung H_L wird mit der erweiterten Stefan-Boltzmann Gleichung für die Strahlung von schwarzen Körpern modelliert (Formel 5.13). Dabei ist die Einstrahlung proportional zur vierfachen Potenz der Temperatur T_A und der langwelligen Emissivität E_A in der Atmosphäre. Abgeschwächt wird die Einstrahlung durch die Reflexion an der Wasseroberfläche r_L . Die langwellige Einstrahlung erfolgt über die gesamte Flussoberfläche, unabhängig von der Beschattung.

$$H_L = (1 - r_L) E_A \sigma T_A^4 \quad (5.13)$$

r_L : An der Wasseroberfläche reflektierter Anteil der Strahlung [-]

E_A : langwellige Emissivität [-]

σ : Stefan-Boltzmann Konstante [$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$]

T_A : absolute Temperatur der Atmosphäre [K]

Der Reflexionskoeffizient r_L für Wassertemperaturen von 0 bis $30 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt 0.030 [And54].

5.4.1 Emissivität

Mit der Emissivität wird die Wärmeabstrahlung einer Oberfläche im Verhältnis zu einem genau definierten schwarzen Körper bezeichnet. Die Emissivität der Atmosphäre ist abhängig von der Temperatur, der Zusammensetzung der Luft und den Wolken. Die Formel 5.14 (von Brutsaert [Bru82] kombiniert mit der

Gleichung von Bolz [Bol49] für die Berücksichtigung des Einfluss der Wolken) liefert, obwohl sie die Zusammensetzung der Luft (insbesondere den Feuchtigkeitsanteil) nicht berücksichtigt, eine genügend genaue Abschätzung.

$$E_A = (1 + cC^2) 1.24 \left(\frac{e_A}{T_A} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (5.14)$$

- c : vom Wolkentyp abhängiger Faktor [-]
- C : Bewölkungsanteil [-]
- e_A : Dampfdruck der Atmosphäre [*mbar*]

Für c wird ein mittlerer Wert von 0.22 verwendet.

Da die Temperatur wie die Solarstrahlung mit der Höhe variiert, wird bei diesem Parameter ebenfalls ein höhenabhängiger Gradient berücksichtigt.

5.5 Langwellige Ausstrahlung

Wie die Atmosphäre strahlt auch der Wasserkörper über die Wasseroberfläche Energie ab. Die langwellige Ausstrahlung H_w kann ebenfalls mit der Stefan-Boltzmann Gleichung, erweitert mit dem Emissionsfaktor von Wasser (E_W), bestimmt werden (Formel 5.15).

$$H_W = -E_W \sigma T_W^4 \quad (5.15)$$

E_W : Emissivitätsfaktor der Wasseroberfläche [-]

Als Emissionsfaktor wird der von Anderson [And54] empfohlene Wert von 0.970 ± 0.005 verwendet.

5.6 Verdunstung/Kondensation

Bei der Verdunstung H_S verliert der Fluss Energie durch die Verdunstungswärme und die fühlbare Wärme des verdampften Wassers. Der erste Faktor kann gegenüber dem zweiten vernachlässigt werden, da die Verdunstungswärme von Wasser viel grösser ist als die Wärmekapazität.

Der Wärmeaustausch ist abhängig von der Differenz zwischen dem Dampfdruck an der Wasseroberfläche und dem Dampfdruck in der Luftschicht über dem Wasser und der Austauschgeschwindigkeit. Der Dampfdruck der Luftschicht hängt dabei vom Austausch dieser Luftschicht mit der restlichen Atmosphäre ab. Als Ansatz zur Beschreibung dieser Verhältnisse hat sich die Formel 5.16 bewährt, dabei wird der Austausch mit einer empirischen Windfunktion parametrisiert.

$$H_S = -f_M (e_W - e_A) \quad (5.16)$$

- f_M : Windfunktion (siehe Formel 5.19) [$W/m^2/mbar$]
- e_W : Dampfdruck bei der Temperatur der Wasseroberfläche (siehe Formel 5.17) [*mbar*]
- e_A : Dampfdruck der Atmosphäre (siehe Formel 5.18) [*mbar*]

$$e_W = e_S^0 \cdot e^{\frac{L_W M_W}{R} \left(\frac{1}{T^0} - \frac{1}{T_W} \right)} \quad (5.17)$$

$$e_A = RH \cdot e_S^0 \cdot e^{\frac{L_W M_W}{R} \left(\frac{1}{T^0} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (5.18)$$

T^0 : Referenztemperatur [273K]

e_s^0 : Sättigungsdampfdruck bei der Referenztemperatur T^0 [6.108 mbar]

L_W : Verdunstungswärme von Wasser [$2.45 \cdot 10^6$ J/kg]

M_W : Molekulare Masse von Wasser [18 kg/mol]

R : universale Gaskonstante [8.31 J/K/mol]

RH : relative Feuchte; [-]

Die verwendete Windfunktion (Gleichung 5.19) wurde von Kuhn [Kuh78] ursprünglich für den Zürichsee entwickelt.

$$f_M = p_1 + p_2 u_{10} + p_3 (T_W - T_A) \quad (5.19)$$

p_i : empirische Parameter

u_{10} : Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe [m/s]

Meier [Mei96] hat die Parameter p_i im Rahmen einer Studie an an der Glatt an die speziellen Verhältnisse von kleinen Fließgewässern angepasst.

$$\begin{aligned} p_1 &= 13W/m^2/mbar \\ p_2 &= 0.86J/m^3/mbar \\ p_3 &= 0.17W/m^2/mbar/K \end{aligned}$$

Falls die Lufttemperatur unter den Taupunkt fällt, findet Kondensation statt. In diesem Fall gewinnt das Wasser Energie.

5.7 Konvektion

Die Konvektion H_C beschreibt den Austausch von fühlbarer Wärme des Wassers mit der Luft. Wenn die Temperatur in der Luft höher ist als im Wasser (im Sommer meist der Fall), gewinnt das Wasser durch diesen Prozess Energie.

Dieser Prozess ist ebenfalls vom Austausch der Luftschicht über dem Wasser und somit von der Windfunktion abhängig. Die Konvektion kann mit der Formel 5.20 beschrieben werden.

$$H_C = -B f_M (T_W - T_A) \frac{p}{1000} \quad (5.20)$$

B : Bowenfaktor [1/K]

p : Luftdruck [mbar]

Für einen Bergbach mit einer rauhen Oberfläche verwendet Meier einen Bowenfaktor von 0.661/K.

5.8 Dissipation

Durch das Gefälle des Baches wird potentielle Energie des Wassers in kinetische Energie umgewandelt. Dabei wird annähernd die gesamte Differenz der potentiellen Energie durch die Dissipation (Reibung) H_{diss} in Wärme umgewandelt. Die Anteile der in Schall und Erosion umgewandelten Energiemengen sind bei normalen Abflüssen vernachlässigbar. Bei grösseren Abflussmengen mit Erosion und Transport von Geschiebematerial wird ein Teil in Bewegungsenergie umgewandelt. Dieser Anteil wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Aus dem Satz der Energieerhaltung lässt sich die Grösse der Dissipation herleiten. Auf einen Wärmefluss pro Quadratmeter umgerechnet (zum Vergleich mit den anderen Energieflüssen) ergibt sich die Formel 5.21.

$$H_{diss} = \rho g S_0 \frac{Q}{w} \quad (5.21)$$

g : Erdbeschleunigung [$9.81m/s^2$]
 S_0 : Gefälle des Bachbetts [-]

5.9 Weitere Energieflüsse

Eine Änderung des Wärmehaushalts ist auch durch Niederschläge, chemische und biologische Prozesse im Wasser möglich. Die Auswirkungen dieser Vorgänge werden vernachlässigt, da ihre Auswirkungen verglichen mit den anderen Energieflüssen sehr klein sind. Dieses Vorgehen wurde in den Studien von Meier und Evans [ERE98] auch so gehandhabt. Bei starkem Regen oder Schneefall können allfällige Abweichungen der Resultate von den Messwerten u.a. darauf zurückgeführt werden.

Kapitel 6

Unsicherheitsanalyse

Die im Modell verwendeten Eingabegrößen, können in der Regel nicht genau bestimmt werden. Bei Abschätzungen muss von einem Fehler ausgegangen werden, aber auch Messresultate sind mit methodischen Fehlern behaftet.

Ziel der Unsicherheitsanalyse ist es, zu überprüfen, wie stark sich die Unsicherheit der verwendeten Parameter auf die Unsicherheit der simulierten Resultate auswirkt. Zudem wird erruiert, welche Mess-Ungenauigkeiten den grössten Einfluss haben.

Der Einfluss eines Parameters auf die Modellvariable wird bestimmt, indem der Parameter geringfügig variiert wird und die entsprechende Auswirkung (absolute Änderung) auf die Modellvariable berechnet wird (Formel 6.1) [Rei98b, Sta99].

$$\delta_{y,p}^{a,a} = \frac{\partial y}{\partial p} \quad (6.1)$$

δ : Absolut-absolut Sensivitätsfunktion

y : Modellvariable

p : Modellparameter

Um die Unsicherheit der Modellvariable in Abhängigkeit aller verwendeten Parameter zu bestimmen, wird in dieser Arbeit die lineare Fehlerfortpflanzung verwendet. Dabei wird die Standardabweichung der Modellvariablen aus den Standardfehlern der verwendeten Parameter berechnet (Formel 6.2). Bei dieser Methode wird die Beziehung zwischen den einzelnen Parametern vernachlässigt.

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial p_i}\right)^2 \sigma_{p_i}^2} \quad (6.2)$$

σ_y : Standardfehler der Modellvariablen

p_i : Modellparameter i

σ_{p_i} : Standardfehler des Parameters i

m : Anzahl der Modellparameter

Die Unsicherheit der Modellvariablen kann damit für einen bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit berechnet werden. Um einen repräsentativen Wert zu

erhalten, wird die Unsicherheit über die Zeit gemittelt. Dabei wird der Mittelwert der absoluten Werte berechnet.

Kapitel 7

Messungen und Analysen in den Untersuchungstrecken

7.1 Lonza

Der Verlauf der Lonza ist in der Abbildung 7.1 als Höhenprofil dargestellt.

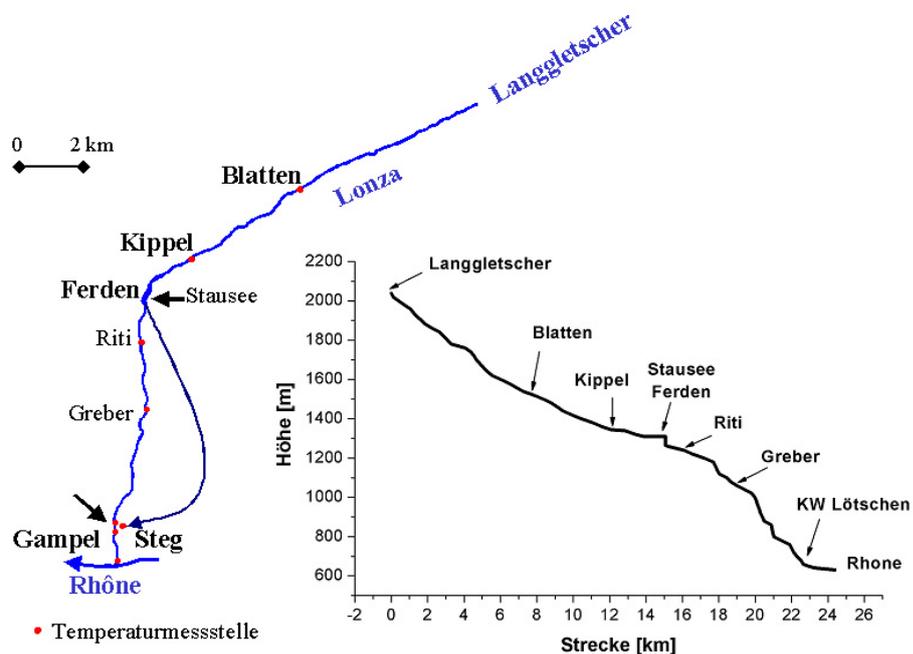


Abbildung 7.1: Schematische Abbildung mit den Temperaturmessstellen sowie Höhenprofil der Lonza vom Langgletscher bis zum Einfluss in die Rhône.

Vom Langgletscher bis zur Rhône beträgt die Fließstrecke der Lonza 24 km und überwindet dabei eine Höhendifferenz von 1400 m, was einem mittleren Gefälle von 5.8% entspricht.

Für die Untersuchung der Lonza wurde der Fluss in drei Streckenabschnitte unterteilt. Der erste beschreibt den Abschnitt bis zum Stausee in Ferden. Der zweite Abschnitt umfasst die Restwasserstrecke vom Stausee bis zur Rückleitung des Wassers unterhalb des Kraftwerkes in Gampel-Steg. Der letzte Abschnitt geht von der Kraftwerksrückleitung bis zur Mündung in die Rhône.

7.1.1 Streckenabschnitt Blatten-Ferden

Im ersten Abschnitt vom Gletscherausfluss bis nach Ferden entspricht der hydraulische Abfluss der Lonza den natürlichen Begebenheiten. Mit den Untersuchungen wird in Blatten begonnen. Die Strecke von Blatten bis zum Beginn des Stausees misst 6 km , der Höhenunterschied zwischen den zwei Punkten beträgt 210 m (mittleres Gefälle 3.5%). Ein Foto dieses Streckenabschnittes ist in der Abbildung 7.2 zu sehen.



Abbildung 7.2: Foto der Lonza bei Kippel (Foto: 10.6.02 Werner Meier).

Startmesspunkt Blatten

In Blatten auf 1520 müM befindet sich eine hydrologische Messstation des Bundesamts für Wasser und Geologie, kurz BWG (Foto der Messstation in der Abbildung 7.3). Dort werden stündlich die Parameter Wasserstand, Abfluss und Temperatur des Wassers erfasst. Die Abfluss- und Temperaturdaten werden bei der Modellierung als Eingabewerte verwendet.

Vom BWG wurde auch eine genaue Charakterisierung des Einzugsgebietes vorgenommen. Die Grösse des Einzugsgebietes oberhalb von Blatten beträgt



Abbildung 7.3: Foto der BWG Messstation in Blatten (Foto: 10.6.02 Werner Meier).

77.8 km² wovon ein grosser Teil (36.5%) vergletschert ist. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes beträgt 2630 m.

Ebenfalls in Blatten befindet sich eine Wetterstation der MeteoSchweiz (Foto in der Abbildung 7.4). Bei dieser Station werden Klimaparameter wie Lufttemperatur, Niederschlag, Bewölkung usw. aufgezeichnet. Verschiedene Messungen dieser Station werden im Verlauf der Untersuchung verwendet.

Eine Graphik mit den für diese Arbeit wichtigen Messwerten der BWG-Station, Abfluss und Temperatur während des Sommers 02, ist in der Abbildung 7.5 aufgezeichnet.

Der mittlere Abfluss im Sommer 02 (Juni bis September) betrug 10.7 m³/s, die Spannweite variierte von 2.4 bis 28.8 m³/s. Die Wassertemperaturen schwankten von 2.5 bis 9.7°C, die mittlere Variation zwischen Tagmaxima und Nachtminima lag zwischen 2 und 4°C.

Die Abflussspitzen können anhand der Klimadaten als warme Tage mit viel Schmelzwasser oder Tage mit grossen Niederschlagsmengen identifiziert werden. Die Wassertemperatur reagiert bei Niederschlagsereignissen mit einer Temperaturabsenkung.

Kippel

Um die Temperaturveränderung auf dem ersten Abschnitt zu analysieren, wurde bei Kippel ein zusätzlicher Temperaturlogger installiert, der die Wassertemperatur in der Lonza alle 20 Minuten aufzeichnet. Der Logger wurde am 10. Juni



Abbildung 7.4: Foto der BWG Messstation in Blatten (Foto: 10.6.02 Werner Meier).

eingesetzt. Der Logger befindet sich 4.2 km nach Blatten auf einer Höhe von 1345 müM. Zusammen mit den Werten von Blatten sind die Messresultate in der Abbildung 7.6 dargestellt.

Die Tagesspitzenwerte werden an beiden Stellen in der Regel am Nachmittag erreicht. Sie sind zwischen den 2 Stationen um etwa eine Stunde verschoben, in Blatten werden die höchsten Werte um 15 Uhr (Spannweite 12 bis 18 Uhr) in Kippel um 16 Uhr (Spanne von 13 bis 20 Uhr) gemessen. Die Tagestiefstwerte werden an beiden Stationen im Verlauf des Vormittags gemessen.

Die beobachtete Verzögerung wird bei der Berechnung der Temperaturdifferenz berücksichtigt, indem der Wert von Blatten mit dem eine Stunde später gemessenen Wert in Kippel verglichen wird.

Wenn man die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Stationen betrachtet, sieht man, dass die Werte in Kippel während der Messperiode (von Juni bis September) höher sind als in Blatten. Die Wassertemperaturen nehmen normalerweise in alpinen Fließgewässern invers zur Höhenlage zu. Die Temperaturen des Schmelz- und Regenwassers sind in den hohen Lagen tief. Im Verlauf der Fließstrecke wird das Wasser durch die Reibung und die äusseren Bedingungen (Sonneneinstrahlung und Wärmestrahlung der Atmosphäre) aufgewärmt. Die Erwärmung ist an Sommertagen am grössten, während der Nacht und im Winter kann es auf Grund des geringeren Netto-Energiezuflusses (Energieverlust wird grösser als Energiezufluss) unter Umständen auch zu Temperaturabnahmen kommen.

Während der Untersuchungsperiode hat sich die Temperatur zwischen den

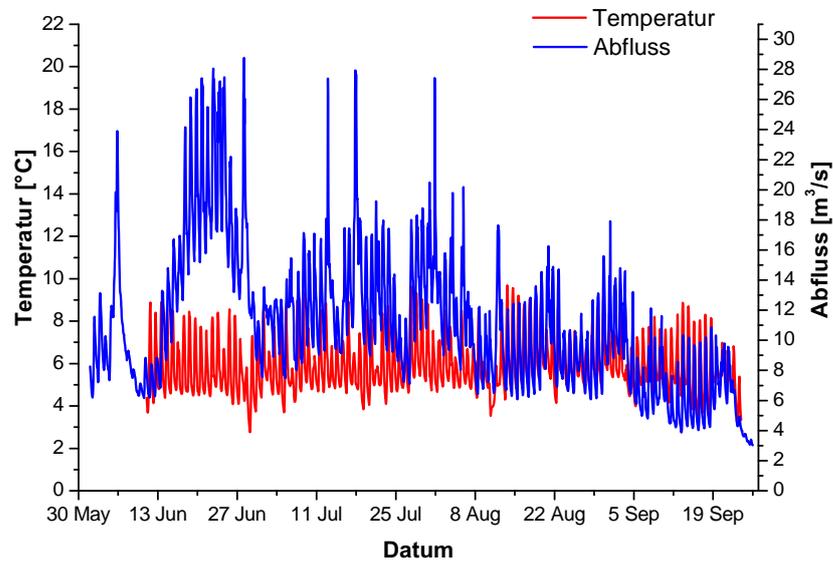


Abbildung 7.5: Abfluss- und Temperaturmessung der BWG-Station in Blatten im Sommer 2002 von Juni bis September (Quelle BWG).

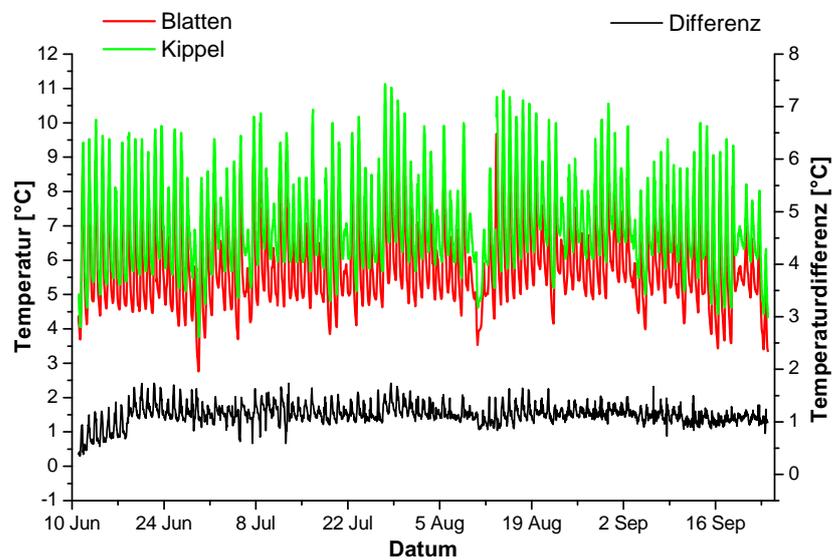


Abbildung 7.6: Temperaturmessungen in Blatten und Kippel (linke Skala), sowie die Differenz (rechte Skala) im Sommer 2002.

2 Stationen im Schnitt um 1.1°C erhöht. Die grösste Differenz betrug 1.7 die kleinste 0.4°C .

Stausee

Bei Ferden wird die Lonza durch eine 67 m hohe Staumauer aufgestaut. Der maximale Seepegel liegt auf 1311 müM. Das Staubecken wurde zur Energieproduktion gebaut. Das im Staubecken abgezweigte Wasser wird durch eine Druckleitung zum Kraftwerk Lötschen nach Gampel-Steg (650 müM) geleitet. Nach der Energiegewinnung wird das Wasser in Gampel-Steg wieder in den Fluss zurückgeführt.

Der Stausee ist relativ klein: das Stauvolumen beträgt 1.89 Mio m^3 . Aus dem durchschnittlichen Zufluss in den See kann eine mittlere Aufenthaltszeit von 36 Stunden berechnet werden. Der See ist als Fortsetzung der Lonza längs in das Tal eingebettet, die Länge des eigentlichen Stausees beträgt etwa 1 km. Als Oberfläche wird eine Grösse von 10.6 ha angegeben. Das Einzugsgebiet beträgt 139.2 km^2 [Swi].

Die Angaben zu den Zuflussmengen des Stausees wurden freundlicherweise von den Kraftwerksbetreibern zur Verfügung gestellt [Sch02]. Der Zufluss in den Stausee korreliert gut mit der Abflussmessung in Blatten (Korrelationskoeffizient $R = 98\%$), durch die lateralen Zuflüsse vergrössert sich die Abflussmenge auf die 1.43 fache Menge (durchschnittliche Zuflussmenge von Juni bis September 14.7 m^3/s).

Vom Stausee wird während des Sommers (von April bis September) eine Restwassermenge von 100 l/s (Foto Abbildung 7.7) abgegeben, während des Herbsts und Winters wird kein Wasser vom Stausee in den Bach geleitet.

Auf Grund des geringen Stauvolumens kann das Wasser nicht über längere Zeit im Stausee angesammelt werden. Das Wasser wird deshalb laufend zur Energieproduktion abgeleitet. Bei grossen Zuflussmengen läuft das Kraftwerk deshalb ohne Unterbruch, bei kleinerem Abfluss wird der Kraftwerksbetrieb über Nacht eingestellt oder reduziert. Die maximale Wassernutzmenge des Kraftwerks liegt bei 22 m^3/s . Bei einem grossen Zufluss in den Stausee kann nicht alles Wasser verarbeitet werden und ein Teil des Wasser läuft über die Staumauer in die Flussstrecke unterhalb des Sees. In der Abbildung 7.8 sind der Zufluss, die abgezweigte Wassermenge und der Überlauf (mit der Restwassermenge) graphisch dargestellt.

Als Folge des grossen Wasserzuflusses gab es vom 18. bis zum 28. Juni 02 eine längere Phase mit Überlauf. In dieser Zeit konnte das Kraftwerk trotz Vollbetrieb nicht die gesamte Wassermenge verarbeiten.

Tunnelkühlung für die Neat

Im Rahmen der neuen Eisenbahn-Alpentransversalen (Neat) befindet sich seit Juli 1999 der Basistunnel am Lötschberg im Bau. Mit dem bereits bestehenden Simplontunnel entsteht die erste alpenquerende Eisenbahn-Achse Europas, die durchgehend über vergrösserte Tunnelquerschnitte verfügt. Die grossen Tunnels sind besser auf den Güterverkehr abgestimmt und sollen die Verlagerung des Gütertransports von den Strassen auf die Schienen vorantreiben.

Der Lötschbergtunnel führt von Frutigen im Kandertal nach Raron im Wallis. Um die Bauzeit zu verkürzen, wurden nicht nur an den beiden Enden mit



Abbildung 7.7: Foto des Restwasserausfluss aus dem Stausee Ferden (Foto: 10.6.02 Werner Meier).

den Vortriebsarbeiten begonnen, sondern zusätzlich auf der Strecke über drei Fensterstollen der Bau vorangetrieben. Im Tunnel herrschen hohe Temperaturen. Um trotzdem arbeiten zu können, muss die Tunnelluft gekühlt werden.

Ein Fensterstollen befindet sich in Goppenstein. Über diesen Zwischenangriff wird Wasser aus dem Staubecken des Kraftwerkes Lötschen mit Hilfe von zwei voneinander getrennte Wasserkreisläufe bis zur Tunnelbrust im Berginneren herangeführt und dort für die Baukühlung verwendet. Das Wasser aus dem Staubecken und das des Tunnelkühlungssystems bilden dabei zwei getrennte Kreisläufe, wobei das Wasser des Stausee nur dazu verwendet wird, um das Tunnelkühlwasser zu kühlen. Ein Wasseraustausch zwischen beiden Systemen findet dabei nicht statt. Der maximale Wärme-Input ins Staubecken Ferden beträgt nach Angaben der IGWS (Ingenieurgesellschaft Westschweiz, verantwortlich für den Walliser Teil des Projektes Lötschberg Basistunnels) maximal 5 MW [Aes02]. Im Sommer 2002 betrug der Input ungefähr 3 MW. Bei einem durchschnittlichen Abfluss von $14.7 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die dadurch verursachte Temperaturerhöhung 0.05°C . Der Rückfluss des zur Kühlung verwendeten Wassers befindet sich in der Nähe der Staumauer. Falls ein verhältnismässig grösserer Anteil des erwärmte Baustellenwassers auf die Restwasserstrecke gelangt (zum Beispiel bei Überlauf), kann die Erwärmung in diesem Abschnitt stärker ausfallen.

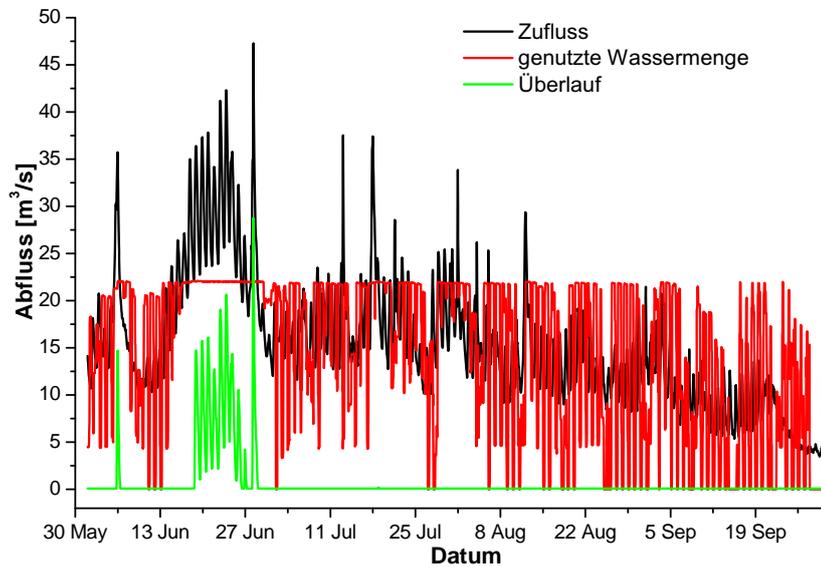


Abbildung 7.8: Der Zufluss, die genutzte Wassermenge und der Überlauf (inklusive Restwassermenge) des Stausees bei Ferden während dem Sommer 2002.

7.1.2 Streckenabschnitt Ferden-Gampel

Von Ferden bis nach Gampel fliesst die Lonza durch ein enges, steiles Tal. Das Gefälle beträgt in diesem Abschnitt 7.8% auf einer Strecke von 7.8 km (Höhenunterschied 620 m). Wobei die Geometrie und das Gefälle des Flusses erheblich variieren. (Fotos dreier Stellen auf der Strecke in der Abbildung 7.9).



Abbildung 7.9: Fotos der Lonza auf der Restwasserstrecke zwischen Ferden und Gampel an verschiedenen Stellen (Fotos: 12.10.02).

Auf dieser natürlichen Wasserstrecke fließt seit der Inbetriebnahme des Stausees unterhalb des Stausees bis nach Gampel nur noch eine reduzierte Wassermenge.

Im Sommer erhält diese Strecke vom Stausee eine Restwassermenge von 100 l/s, dazu kommt noch die Wassermenge bei einem allfälligen Überlauf des Stausees. Bis Gampel wird der Fluss durch die seitlichen Zuflüsse wieder etwas aufgefüllt.

Baustellenabwasser der Neat

Auch diese Flussstrecke wird vom Bau der Neat beeinflusst. Unterhalb von Goppenstein werden etwa 35 l/s Baustellenwasser vom Tunnelbau in die Lonza geleitet.

Das Wasser aus dem Berg hat eine recht hohe Temperatur. Die Vorschriften für diese Einleitung in die Lonza lauten, dass sich die Temperatur im Bach nach der Einleitung des Baustellenwasser um nicht mehr als 1.5 °C erwärmen darf. Vor der Einleitung wird das Wasser durch eine treppenartige Kühlrinne geleitet (Foto Abbildung 7.10). Diese Konstruktion soll den Temperatúraustausch des Wasser mit der Luft fördern und es so (vorallem im Winter, wenn in der Lonza wenig Wasser fließt) zusätzlich kühlen.



Abbildung 7.10: Treppenartige Kühlrinne beim Ausfluss des Baustellenabwassers der Neat (Foto: 12.10.02).

Um das Einhalten der Einleitsbedingungen zu kontrollieren führt das Ingenieurbüro Schneller Ritz und Partner AG in Brig ein Monitoring durch. Da das Baustellenwasser aus der Tiefe des Berges kommt, hat es über das ganze Jahr eine ungefähr konstante Temperatur. Im Sommer stellt das Einhalten der Einleitbedingung kein Problem dar, da die Lonza eine grössere Abflussmenge hat und das Wasser eine höhere Temperatur aufweist. Im Winter wenn die Temperaturen in der Lonza tiefer sind und nur wenig Wasser fliesst, kann es zu Erwärmungen in der Nähe des Einleitkriteriums führen.

Das Ingenieurbüro hat ihre Messresultate freundlicherweise zur Verfügung gestellt [Ver02]. Im Sommer werden auf Grund der geringen Auswirkungen nicht sehr viele Messungen durchgeführt. Die durchschnittliche Temperatur am Ende der Kühlrinne im Sommer wird anhand eigener zusätzlicher Messungen auf etwa $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ geschätzt.

Temperaturmessungen

Um das Temperaturregime auf diesem Streckenabschnitt zu analysieren, wurden drei Logger in den Fluss eingesetzt, welche die Wassertemperatur im 20 Minutenintervall aufzeichnen. Der erste Logger wurde am 10. Juni 02 bei Greber, unterhalb von Goppenstein auf einer Höhe von 1070 müM installiert. Der zweite bei Riti, 1000 m nach der Staumauer (1240 müM), folgte am 13. August. Der Logger am Ende der Restwasserstrecke, kurz vor der Rückleitung des Wassers, konnte erst am 29. August in Betrieb genommen werden (Höhe: 650 müM). Die genauen Standorte der Logger kann man dem Schema in der Abbildung 7.1 entnehmen.

Leider sind nicht alle Temperaturdaten über den gleichen Zeitraum vorhanden. In den Monaten Juni und Juli wurden die Wassertemperaturen nur vom Logger in Greber erfasst. Während dieser Zeit wurden die einzigen Überlaufphasen registriert. Die Überlaufphasen sind interessant, weil die Lonza während dieser Periode bezüglich Abflussmenge, am ehesten den ursprünglichen natürlichen Verhältnissen entspricht. Zur Analyse der Überlaufphase wurden in die Graphik der in Greber gemessenen Wassertemperaturwerten auch die Abflussmenge direkt unterhalb des Stausees (Restwasser plus Überlauf), sowie die von der MeteoSchweiz gemessenen durchschnittlichen Tageslufttemperaturen in Blatten aufgezeichnet (Abbildung 7.11) .

Bei einer qualitativen Analyse erkennt man, dass während der Überlaufphase die höchsten Lufttemperaturen dieses Sommers gemessen wurden. Die hohen Temperaturen sind auch die Ursache für den grossen Abfluss, weil sie zu grossen Mengen Schmelzwasser führen. Hohe Lufttemperaturen sollten auf den ersten Blick auch zu höheren Wassertemperaturen führen. Diesen Zusammenhang kann man gut in der ersten Messwoche (vor dem Überlauf) erkennen, mit der Lufttemperatur steigt auch die gemessene Wassertemperatur in der Lonza. Durch den Überlauf kommt es danach aber zu einem Einbruch in der Wassertemperatur von etwa 3°C während des Tages, obwohl sich die Lufttemperatur nicht erheblich ändert.

Der Einbruch lässt sich mit der Abflussmenge erklären: Eine kleinere Wassermenge erwärmt sich schneller als eine grosse. (Der Wärmeinput in das Wasser findet hauptsächlich über die Wasseroberfläche statt. Bei grösserem Abfluss nimmt die Wasseroberfläche im Verhältnis zum Volumen weniger zu. Der Wärmeinput ins Wasser wird bei grösserem Abfluss zwar etwas vergrössert, der Input

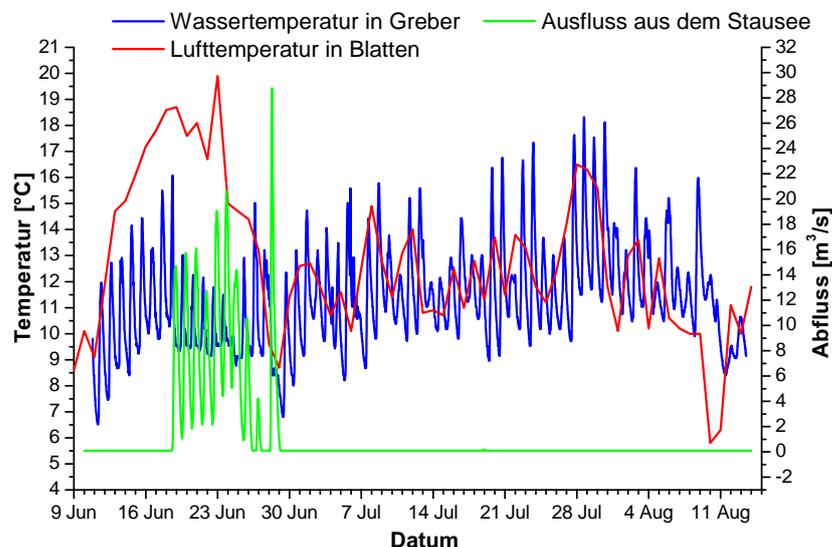


Abbildung 7.11: Wassertemperatur in Greber, Abflussmenge aus dem Stausee in Ferden und die in Blatten gemessene Lufttemperatur im Sommer 02.

verteilt sich aber auf ein viel grösseres Volumen, was zu einer kleineren Erwärmung führt.)

Beim grossen Überlaufpeak am Schluss dieser Phase (28. Juni) ist die Lufttemperatur gefallen. Die grosse Wassermenge ist hier auf den Niederschlag zurückzuführen: vor dem Überfluss wurde in Blatten eine grosse Niederschlagsmenge registriert (38 mm in 24 Stunden). Weil der Stausee schon gefüllt war, führte dieser Niederschlag zu einem Überlaufen des Sees. Die Wassertemperatur auf der Restwasserstrecke sinkt bei dieser grossen Wassermenge noch weiter ab. Die Abkühlung kann dabei zum Teil auch auf die äusseren Bedingungen zurückgeführt werden (tiefere Umgebungstemperaturen, weniger Sonneneinstrahlung).

Ab dem 29. August wurden die Wassertemperaturen an allen 3 Stellen gemessen. Die Resultate sind in der Abbildung 7.12 dargestellt.

Die Wassertemperatur nimmt auf der 2.7 km langen Strecke (170 Höhenmeter) von Riti nach Greber im Mittel um 1.3°C zu. Die Differenzen während der Nacht sind teilweise etwas kleiner als am Tag, dieser Unterschied ist aber nur gering (ca. 0.3°C). Die Erwärmung auf dieser Strecke ist auf die Reibung, die Sonneneinstrahlung und die Wärmestrahlung der Atmosphäre zurückzuführen. Einen kleinen Einfluss hat auch die Einleitung des warmen Baustellenwassers. Die geringere Erwärmung in der Nacht ist auf die fehlende Erwärmung durch die Sonne zurückzuführen.

Die Temperaturmaxima werden an beiden Stellen im Verlaufe des Nachmittages (von 14 bis 17 Uhr) gemessen, wobei die Maxima beim weiter flussabwärtsliegenden Ort Greber sogar etwas früher gemessen werden.

Im unteren Flussabschnitt von Greber bis nach Gampel (4.1 km bei 420 m Höhenunterschied) nimmt die Temperatur im Mittel um 1.2°C zu. Die Maxima

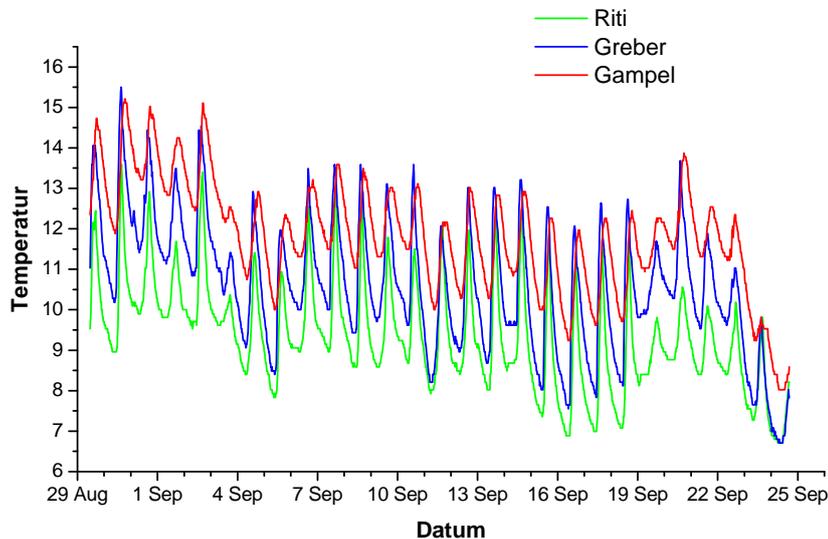


Abbildung 7.12: Gemessene Wassertemperaturen in der Lonza bei Riti, Greber und in Gampel vor der Wasserrückleitung des Kraftwerks im Sommer 02.

und Minima treffen in Gampel etwa eine Stunde nach Greber (15 und 16 Uhr, bzw. 10 und 11 Uhr) ein.

Wenn man die Grösse der Minima und Maxima der Temperaturkurven vergleicht, fällt auf, dass die Temperaturmaxima von Greber nach Gampel nicht zunehmen. Bei den Minima ist hingegen eine Erwärmung von 1.6°C zu erkennen.

Eigentlich würde man erwarten, dass die Differenz während des Tages auf Grund der Sonneneinstrahlung etwas höher ist. Dass die Sonneneinstrahlung in diesem Abschnitt keine grossen Auswirkungen hat, kann durch die starke Beschattung erklärt werden. Nach Greber fliesst die Lonza den grössten Teil der Strecke in einem tiefen, stark beschatteten Tal, so dass praktisch keine Sonneneinstrahlung bis zum Fluss gelangt.

Die grosse Beschattung kann aber noch nicht die vollständig fehlende Erwärmung während des Tages erklären. Allein durch die Reibung erwärmt sich der Fluss von Greber nach Gampel um etwa 1°C . Wenn der Fluss Energie aufnimmt, sich die Temperatur aber nicht verändert, muss es kühlende Einflüsse geben, welche den Energieinput der Reibung kompensieren.

Eine mögliche Erklärung können die zuflussenden Seitenbäche sein. Die Zuflüsse von den seitlichen Flanken unterhalb von Goppenstein sind auf der ganzen Fliessstrecke stark beschattet und sehr steil (hohe Fliessgeschwindigkeit), sie nehmen deshalb ausser der Reibungsenergie nicht gross Energie auf (Foto von 2 Seitenflüssen in der Abbildung 7.13). Beim Zufluss in die Lonza weisen diese Zuflüsse während des Tages, deshalb möglicherweise eine tiefere Temperatur als die Lonza auf (diese Vermutung konnte durch punktuelle Messungen bei der Begehung bestätigt werden). Da die Zuflüsse der Lonza von Greber bis nach Gampel etwa ein Drittel der gesamten Wassermenge bei Restwasserabfluss aus-

machen ist dieser Einfluss nicht zu unterschätzen. In der Nacht ist das Wasser in der Lonza kühler, die Differenz zu den seitlichen Zuflüssen geringer, so dass die Zuflüsse keine Auswirkungen auf die Temperatur der Lonza haben.



Abbildung 7.13: Zwei seitliche Zuflüsse der Lonza zwischen Greber und Gampel, links beim Bächigrabe, rechts beim innere Schwelliwald (Foto: 10.6.02).

Weiter können auch die Verdunstung, die ausgleichende Wirkung der Vegetation, der Wärmeaustausch mit dem Sediment oder die Grundwasserinfiltrationen eine Rolle spielen.

Flussgeometrie

Aufgrund der Flussgeometrie kann die Restwasserstrecke grob in zwei Strecken unterteilt werden.

Der obere Teil umfasst die Strecke von der Staumauer bis nach Goppenstein. In diesem 2600 m langen Abschnitt ist die Lonza noch nicht so steil (mittleres Gefälle von 3.3%). Das Flussbett hat hier eine mittlere Breite von ungefähr 4.5 m und eine Korngrößenkennzahl D_{85} von 48 cm. Der Böschungswinkel beträgt ungefähr 70°.

Der steilere Teil der Lonza beginnt unmittelbar nach der Einleitung des Baustellenwassers in Goppenstein. In diesem Abschnitt wird das Flussbett enger (Abschätzung 3 m) und die Böschung steiler (Winkel 50°). Bei der Korngrößenanalyse auf der unteren Strecke wurde für D_{85} ein Durchmesser von 40 cm ermittelt.

Die Abschätzungen der geometrischen Flusseigenschaften sind auf Grund der grossen Variationen im Verlauf der Fliessstrecke schwierig und es bleibt auch nach der Begehung eine relativ grosse Unsicherheit. Um die Unsicherheiten in

einer Sensitivitätsanalyse untersuchen zu können, müssen die Standardabweichungen für die verwendeten Werte abgeschätzt werden.

Abflussmessungen mittels Tracermessungen

Bei der Modellierung von Flusssystemen ist es wichtig, einen Überblick über die Abflussverhältnisse im System zu haben. Zu diesem Zweck wurden an verschiedenen Stellen zu verschiedenen Zeiten mittels Tracerversuche die Abflussmengen und die Reibungseigenschaften bestimmt.

Die Resultate der Abflussmessungen können nicht direkt miteinander verglichen werden, da die Messungen an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden. Auf die für die Abschätzung der hydraulischen Parameter durchgeführten Tracermessungen, wird im Kapitel 8 eingegangen.

Es konnte festgestellt werden, dass die Zuflussmengen über die ganze Flussstrecke mehr oder weniger gleichmässig verteilt sind (Anhang A, Tabelle A.1).

7.1.3 Streckenabschnitt Gampel-Rhône

Der letzte Abschnitt startet beim Kraftwerkszufluss in Gampel-Steg und umfasst die Strecke vom Kraftwerk bis zur Mündung in die Rhône (Distanz 1500 m). Das Gefälle in diesem Abschnitt beträgt nur noch 1%.

Flussgeometrie

Die Flussgeometrie in diesem Abschnitt ist sehr monoton, da der ganze Abschnitt kanalisiert ist. Die Bachbettbreite beträgt zu Beginn 9 m am Ende 10 m (Standardfehler 1 m), da die Wände des Kanals sehr steil sind, beträgt der Böschungswinkel 5° (Standardfehler 5°). Die Korngrösse konnte auf Grund des grossen Abflusses nicht bestimmt werden. Das Fundament des Baches ist gemauert und es befinden sich einzelne grössere (50 cm) Steinblöcke im Kanal.

Abfluss

Der Abfluss in diesem Abschnitt wird stark vom Kraftwerk geprägt. In der Restwasserstrecke fliesst eine Wassermenge in der Grössenordnung von ca. 1 m³/s; das Kraftwerk hat bei Vollbetrieb einen Abfluss von 22 m³/s.

Beim Kraftwerk handelt es sich um ein Laufkraftwerk, welches während der meisten Zeit in Betrieb ist. Bei niedrigem Strombedarf und kleinem Abfluss in der Lonza wird die Stromproduktion aber gestoppt. Diese Unterbrüche führen zu starken Schwall und Sunk in diesem Abschnitt. Die vom Kraftwerk in die Lonza geleitete Wassermenge entspricht dem in Ferden abgezweigten Wasser (Vergleiche Abbildung 7.8).

Temperaturmessungen

Zur Bestimmung der Temperatur wurde ein Logger beim Ausfluss des Kraftwerks installiert. Die dabei gemessenen Temperaturen sind in der Graphik in der Abbildung 7.14 dargestellt.

Auf den ersten Blick weist die Temperaturmessung beim Kraftwerksausfluss grosse Schwankungen auf. Wenn man die Temperaturmessung aber mit

der ebenfalls in der Graphik eingezeichneten turbinieren Wassermenge vergleicht, sieht man, dass sobald das Kraftwerk in Betrieb ist, das Wasser eine Temperatur von $7-8^{\circ}\text{C}$ aufweist. Kleine Unterschiede können auf Grund der unterschiedlichen Datenaufösung entstehen (die Temperatur wird alle 20 Minuten gemessen, während der Ausfluss ein Stundenmittelwert ist). Diese Temperatur des Kraftwerksausfluss entspricht in etwa der Temperatur des Stausees. Wenn das Kraftwerk abgestellt wird schnell die Temperatur in die Höhe.

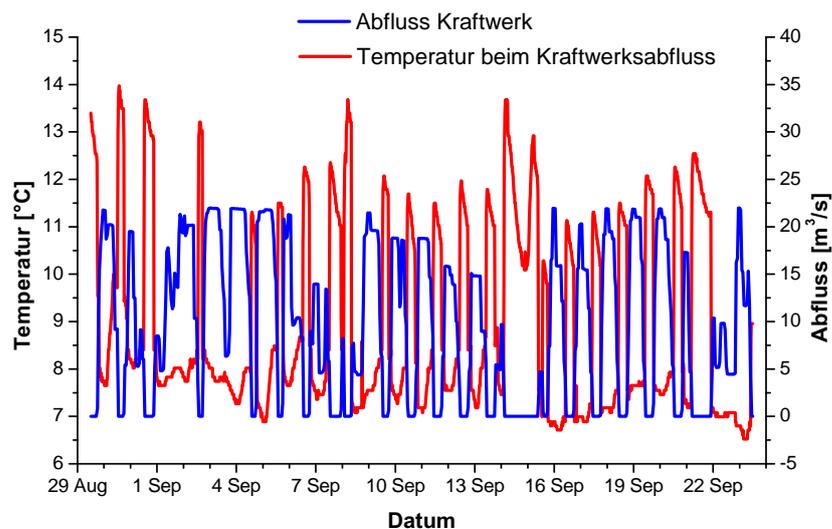


Abbildung 7.14: Temperatur (linke Skala) und turbinieren Wassermenge (rechte Skala) beim Kraftwerk in Gampel-Steg im Sommer 2002.

Den Zusammenhang kann man verstehen, wenn man den genauen Messstandort des Temperaturloggers kennt. Der Logger ist beim Ausfluss des Kraftwerks befestigt, wenn Wasser turbinieren wird, misst er die Temperatur des turbinieren Wassers. Wird der Kraftwerkbetrieb gestoppt, bleibt der Logger liegen. Das Wasser der Restwasserstrecke fließt, wenn die Strömung des Kraftwerksausfluss fehlt, zum Logger zurück und der Temperaturlogger zeichnet die Temperatur des Restwassers auf. Ein Foto der Situation ist in der Abbildung 7.15 wiedergegeben.

Ein weiterer Temperaturlogger soll die Mischtemperatur des Kraftwerksausfluss und des Restwassers aufzeichnen. Dieser Logger befindet sich kurz vor der Mündung der Lonza in die Rhône. In der Graphik der Abbildung 7.16 sind die Temperaturmesswerte der beiden Zuflüsse (Restwasser, Kraftwerk) und die Mischtemperatur dargestellt.

Auch die Mischtemperatur ist grossen Schwankungen unterworfen. In der Graphik sieht man, dass die Mischtemperatur der Temperatur des Kraftwerksausflusses folgt. Wenn im Kraftwerk Wasser turbinieren wird, ist die Wassertemperatur bei der Mischung ebenfalls tief. Wird der Kraftwerkbetrieb gestoppt, ändert sich auch die Temperatur beim Logger nahe der Rhône.

Wenn das Kraftwerk nicht in Betrieb ist, kann man in der Graphik zwei



Abbildung 7.15: Fotos des Kraftwerksausfluss in Gampel-Steg (rechts), zu einem Zeitpunkt als das Kraftwerk kein Wasser turbinierte. (Fotos: 12.10.02).

Situationen unterscheiden. Auf Grund der geringen Energienachfrage wird der Kraftwerksbetrieb meist während der Nacht eingestellt. In diesem Fall wird bei allen drei Messungspunkten praktisch die gleiche Temperatur gemessen, wegen der fehlenden Sonneneinstrahlung und der geringen Reibungsenergie das Wasser von Gampel bis zur Rhône nicht mehr erwärmt wird. Wenn das Kraftwerk während eines schönen Tages (Sonntag) nicht läuft, sieht die Situation anders aus. Beim Kraftwerksauslass wird die gleiche Temperatur wie bei der Restwasserstrecke gemessen. Auf der 1.5 km langen Strecke bis zur Rhône erwärmt sich das Wasser dann aber durch die Sonneneinstrahlung stark, so dass der Logger nahe der Rhône, eine um bis zu 8°C höhere Temperatur misst.

Die starke Erwärmung bei fehlendem Kraftwerksausfluss kann durch die Wassermenge erklärt werden. Wenn das Kraftwerk turbiniert, ist die Wassermenge in der Lonza viel grösser, der Energieinput durch die Sonneneinstrahlung bleibt aber ungefähr gleich (die Flussoberfläche vergrössert sich auf Grund der Geometrie praktisch nicht). Die grössere Masse reagiert auf eine Energieveränderung viel träger. Dazu hat die Abflussmenge auch Auswirkungen auf die Fließgeschwindigkeit, welche bei kleinem Abfluss verkleinert wird. Bei Sunksituation fliesst das Wasser in der Lonza sehr langsam und hat so länger Zeit, Energie aufzunehmen.

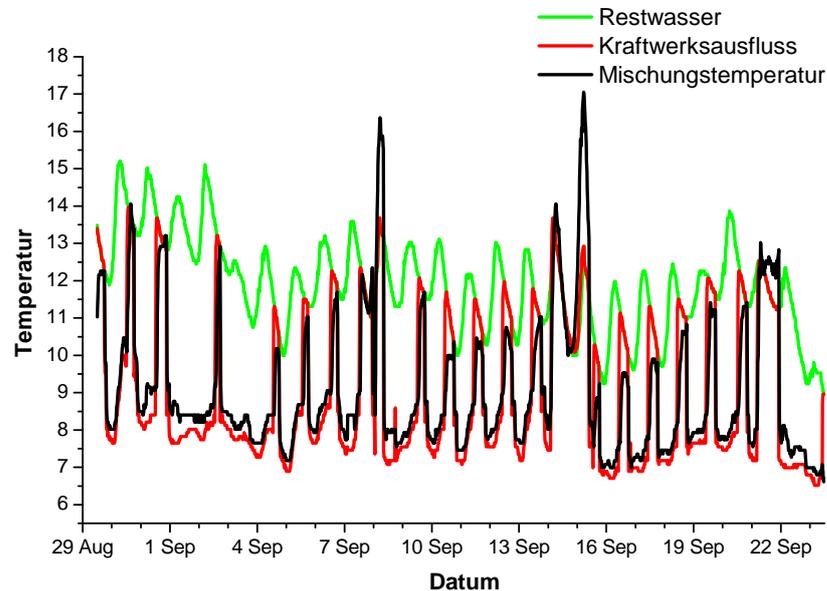


Abbildung 7.16: Gemessene Wassertemperatur des Restwassers, des Kraftwerksausflusses und der Mischung in der Lonza in Gampel im Sommer 02.

7.2 Borgne

Der Verlauf der Borgne mit den wichtigsten hydraulischen Punkten und den Messstandorten der Temperaturlogger ist in der Abbildung 7.17 dargestellt.

Ausgehend von Arolla durchfließt die Borgne bis zur Mündung in die Rhône bei Bramois 33 *km* und durchfließt dabei 1600 Höhenmeter. Das Höhenprofil der Borgne ist in der Abbildung 7.18 abgebildet.

An der Borgne befindet sich keine offizielle hydrologische Messstation des Bundesamt für Wasser und Geologie. Vor dem Bau der Kraftwerke wurde der Abfluss in der Borgne an mehreren Stellen über eine gewisse Zeit gemessen. Diese historischen Daten sind zugänglich. Im Tal befindet sich eine Wetterstation der MeteoSchweiz [Met]. Die Station befindet sich an der östlichen Talflanke 450 *m* über dem Talboden in Evolène-Villa auf 1825 müM.

Für die Untersuchungen im Sommer 02 wurde die Borgne in 3 Abschnitte unterteilt. Im obersten Teil beschränken sich die Untersuchungen auf den Seitenarm der Borgne d’Arolla von der Wasserfassung kurz nach dem Gletscher bis zum Zusammenfluss mit der Borgne de Ferpèche in les Haudères. Der mittlere Abschnitt beginnt in les Haudères und reicht bis zum Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne. Der letzte Abschnitt umfasst den Flusslauf von Euseigne bis zur Mündung in die Rhône bei Bramois.

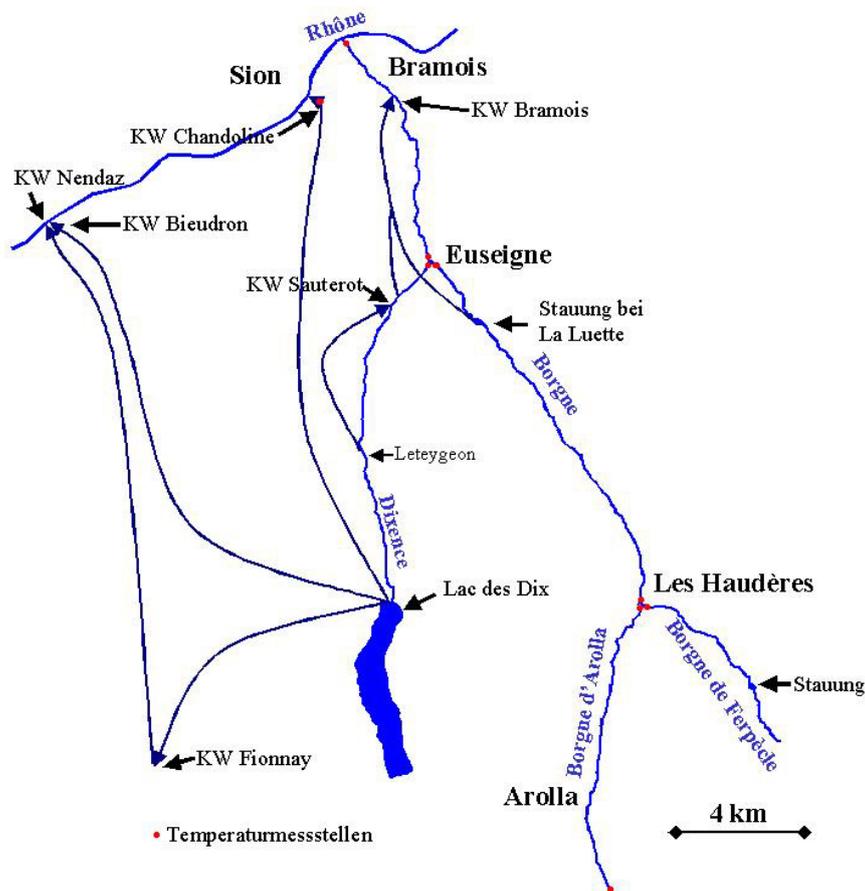


Abbildung 7.17: Schematische Abbildung mit den Temperaturmessstellen der Borge.

7.2.1 Abschnitt Arolla-Les Haudères

Die erste Untersuchungsstrecke der Borge beginnt auf 2111 Meter über Meer bei der Wasserfassung oberhalb von Arolla. Das gefasste Wasser stammt aus dem Gletschergebiet um den Mont Collon (Glacier du Mont Collon, Haut Glacier d'Arolla und Bas Glacier d'Arolla). Das Ende des ersten Untersuchungsabschnittes befindet sich in les Haudères unmittelbar vor dem Zusammenfluss der Borge d'Arolla mit der Borge de Ferpècle auf 1420 Metern über Meer.

Die Länge der Strecke beträgt ungefähr 10 km. Der Bach überwindet dabei 690 Höhenmeter, was einem mittleren Gefälle von 6.9% entspricht. Auf den ersten 7.5 km beträgt das Gefälle zwischen 5 und 6 % (Foto Abbildung 7.19), danach verläuft der Fluss über eine Strecke von 1.5 km sehr steil (über 15 % Gefälle) und 1 km vor les Haudères wird der Verlauf wieder flacher.

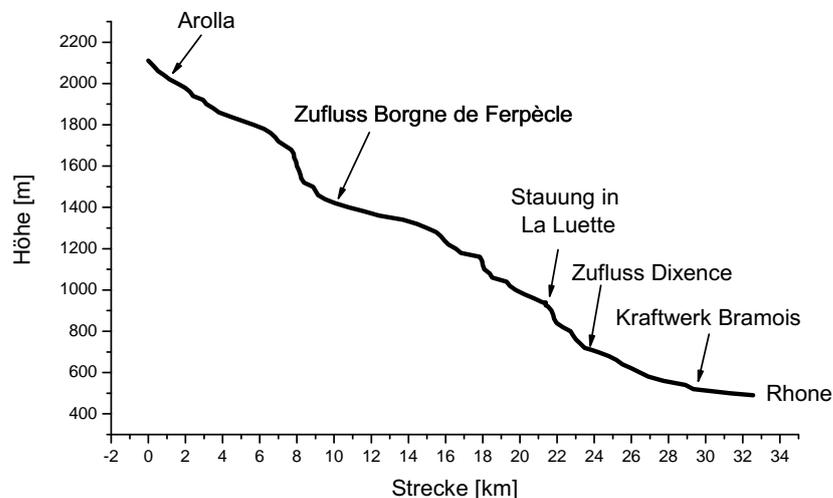


Abbildung 7.18: Höhenprofil der Borgne von der Wasserfassung bei Arolla bis zur Mündung in die Rhône.

Temperaturmessungen

Um die Temperatur dieses ersten Abschnitts zu beobachten, wurden am Anfang und am Ende dieser Strecke je ein Temperaturlogger installiert.

Als Startpunkt wurde das Wasserfassungsbecken oberhalb von Arolla unterhalb des Gletschers gewählt. Die Tiefe des Beckens beträgt einen halben Meter. In der Fassung wird das Wasser unterirdisch weggeleitet und in den Stausee Lac des Dix gepumpt. Betrieben wird die Wasserfassung von den EOS (Energie Ouest Suisse).

Im Verlauf der Untersuchungsperiode wurde der Logger durch den Antransport von Feinmaterial von Sand überlagert, so dass er sich mit der Zeit etwa 5 cm tief im Sand (unter Wasser) befand. Der zweite Logger befindet sich in les Haudères kurz vor dem Zufluss der Borge de Ferpècle (1420 müM). Die Logger wurden am 10. Juli installiert und zeichnete die Wassertemperaturen alle 20 Minuten auf. Ein Ausschnitt der Messresultate ist in der Abbildung 7.20 dargestellt.

Der Mittelwert (Juni bis zum September) der Messung in Arolla beträgt 1.4°C , die Temperaturen sind so tief weil das Wasser direkt aus den Gletschern stammt. Einzelne Messungen, die auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen sind, haben etwas höhere Temperaturwerte. Der Temperaturverlauf zeigt nur eine geringe Tagesschwankung, was bedeutet, dass die Strecke vom Gletscher ausfluss bis zum Fassungsbecken zu kurz ist, um das Wasser am Tag merklich zu erwärmen. Durch die Versandung des Loggers wird der Temperaturengleich weiter verstärkt. Aber auch in den ersten Tagen der Messperiode (oder nach dem Loggerwechsel am 14. August), als der Logger vom Sand befreit wurde, gab es keine grossen Tagesschwankungen.

Die Wassertemperatur erwärmt sich bis les Haudères im Mittel um 6.9°C .



Abbildung 7.19: Borgne zwischen Arolla und les Haudères bei Pramousse (Foto: 16.10.02).

In les Haudères weist der Temperaturverlauf auch einen deutlicheren Tagesgang von 5 bis 6°C auf. Während des Tages wurden Temperaturen bis maximal 13°C, während der Nacht bis minimal 6°C gemessen.

Abfluss

Die Restwassermengen nach der Wasserfassung in Arolla sind nicht konstant. Bei den drei Begehungen im Sommer (10. Juni, 14. August und 24. September 02) wurde Restwasser registriert, am 15. Oktober floss nach der Wasserfassung kein Wasser ins Bachbett.

Im Verlauf dieser ersten Strecke nimmt das Wasservolumen des Flusses durch eine Vielzahl kleiner Zuflüsse zu, wobei bei der Begehung in den zugänglichen Abschnitten kein einzelner sehr grosser Zufluss zu erkennen war.

An der Borgne gibt es keine aktive Messstation, welche den Abfluss kontinuierlich aufzeichnet. Die Abflussmenge der Borgne wurde am 15. Oktober mittels Tracerversuchen an zwei Stellen bestimmt. Im oberen flacheren Teil wurde bei Pramousse eine Messung durchgeführt: der Abfluss betrug 230 l/s; unten wurde die Wassermenge der Borgne d'Arolla kurz vor dem Zusammenfluss mit der Borgne de Ferpècle bestimmt: der Abfluss beträgt hier 680 l/s. An dieser Stelle war schon zu einem früheren Zeitpunkt (14. August) eine Abflussmessung

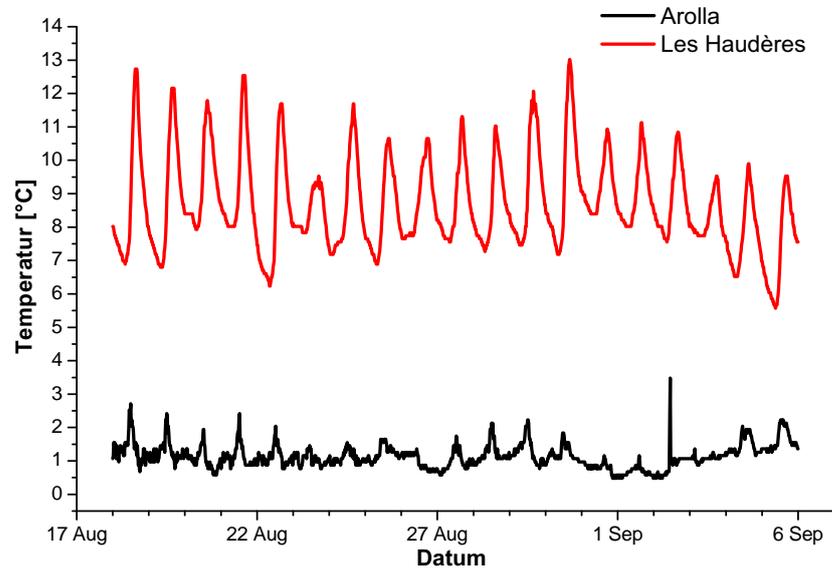


Abbildung 7.20: Ausschnitt aus den Temperaturmessungen in Arolla und in les Haudères in der Borgne d’Arolla im Sommer 2002.

durchgeführt worden, die damals mit 1530 l/s deutlich grösser war. Eine Zusammenfassung der Tracermessungen ist im Anhang A in der Tabelle A.2 zu finden. Aus der Zunahme der gemessenen Abflussmengen im Verlauf der Fließstrecke sieht man, dass die Zuflüsse mengenmässig bedeutend sind.

Weitere Messungen

Um neben der Startbedingung auch den Einfluss der seitlichen Zuflüsse abschätzen zu können, wurde der ganze Streckenabschnitt von Arolla bis Les Haudères am 15. Oktober genauer untersucht und an verschiedenen Stellen wurde die Temperatur und die Flussbreite gemessen. Zusätzlich wurden Beschattung und Bachbettgeometrie abgeschätzt.

Während den Perioden in welchen nach der Wasserfassung kein Wasser oder nur wenig Wasser fließt, wird die Temperatur der Borgne hauptsächlich durch die kleinen seitlichen Zuflüsse bestimmt.

Um einen Überblick über das System zu erhalten, wurden am 15. Oktober die Temperaturen von verschiedenen seitlichen Zuflüssen und der Borgne d’Arolla an verschiedenen Stellen gemessen. Sie sind Momentaufnahmen und erlauben daher nur eine Abschätzung der Verhältnisse, da keine kontinuierliche Messungen durchgeführt werden konnten. Eine Auflistung aller durchgeführten Messungen ist im Anhang A in der Tabelle A.3 wiedergegeben.

Ein Vergleich der Temperaturen ist schwierig, weil nicht alle Messungen gleichzeitig durchgeführt werden konnten und in den Daten somit der Tagesgang unberücksichtigt ist. In einer ersten groben Abschätzung kann man sagen, dass die Temperatur der Zuflüsse von oben nach unten zunimmt. Die Annah-

me, dass die Temperatur der Zuflüsse der Temperatur der Borgne an dieser Stelle entspricht, ist in diesem Abschnitt zulässig, da alle Flüsse ein ähnliches Einzugsgebiet haben (Höhe, Vergletscherung).

Die Breite des Bachbettes ist sehr variabel: von oben nach unten nimmt sie etwa von 2 auf 6 m zu. Der Böschungswinkel (etwa 70°) ist gross, was bedeutet, dass die Oberfläche des Flusses mit steigendem Abfluss stark zunimmt.

7.2.2 Abschnitt Les Haudères-Euseigne

Der zweite Flussabschnitt umfasst die Strecke von les Haudères nach dem Zusammenfluss der Borgne d'Arolla und der Borgne de Ferpèche (1420 müM) bis zum Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne (710 müM). Die Länge dieses Abschnittes beträgt 14 km. Die Borgne durchfließt dabei 710 Höhenmeter. Das Gefälle beträgt auf der ganzen Strecke durchschnittlich 5%.

Die Borgne d'Arolla wurde im vorherigen Abschnitt (Abschnitt 7.2.1) genauer beschrieben. Die Borgne de Ferpèche kommt aus dem Val de Ferpèche vom Gletscher Mont Miné. Ganz oben im Tal hat es einen kleinen Stausee in welchem Wasser gesammelt und in den Stausee Lac des Dix gepumpt wird. Die Borgne de Ferpèche ist also wie die Borgne d'Arolla vorwiegend eine Restwasserstrecke mit kleineren Zuflüssen.

Bei den verschiedenen Begehungen vor Ort waren die Wassermengen in den Zuflüssen in der gleichen Grössenordnung. Bei einer Messung am 14.8.02 wurden in der Borgne d'Arolla ein Abfluss von 1500 l/s und in der Borgne de Ferpèche 1150 l/s gemessen.

Einen entscheidenden Einfluss auf das hydraulische Regime in diesem Abschnitt hat die Stauung in la Luette (940 müM) nach 11 km. Vor dem Stausee ist die Borgne ein breiter Fluss, nach dem Stausee schrumpft die Borgne zu einem kleinen Rinnsal. Am Untersuchungstag (16. Oktober) hatte die Borgne vor der Staumauer einen Abfluss von ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Nach Angaben der Betreiber (Rhönenerke AG) wird in der Konzession keine Restwassermenge vertraglich vorgeschrieben, so dass unmittelbar nach der Staumauer häufig gar kein Wasser mehr fließt. Erst durch seitliche Zuflüsse wird die Wassermenge in der Borgne langsam wieder erhöht. Am 16. Oktober betrug der Abfluss 3 km unterhalb der Staumauer, kurz vor dem Zufluss der Dixence $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$. (Tracerversuche im Anhang A in der Tabelle A.2.

Stauung in La Luette

Das Staubecken in la Luette liegt auf 940 müM. Er ist klein und hat ein Volumen von nur 0.4 mio m^3 . Das in den Stausee gelangende Wasser wird kontinuierlich über eine Druckleitung nach Bramois abgeleitet.

Die abgeleiteten Wassermengen konnten von den Kraftwerksbetreibern (Rhönenerke) bezogen werden. Die über den Sommer 2002 gefasste Wassermenge ist in Abbildung 7.21 dargestellt.

Im Mittel beträgt die turbinierte Abflussmenge von Juni bis September $4.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Die grössten Abflussmengen wurden am 6., 24. und am 28. Juni gemessen (über $10 \text{ m}^3/\text{s}$). Die Abflussspitzen stammen, wie von der Meteo Station Evolène-Villa aufgezeichnet, von grossen Niederschlagsereignissen.

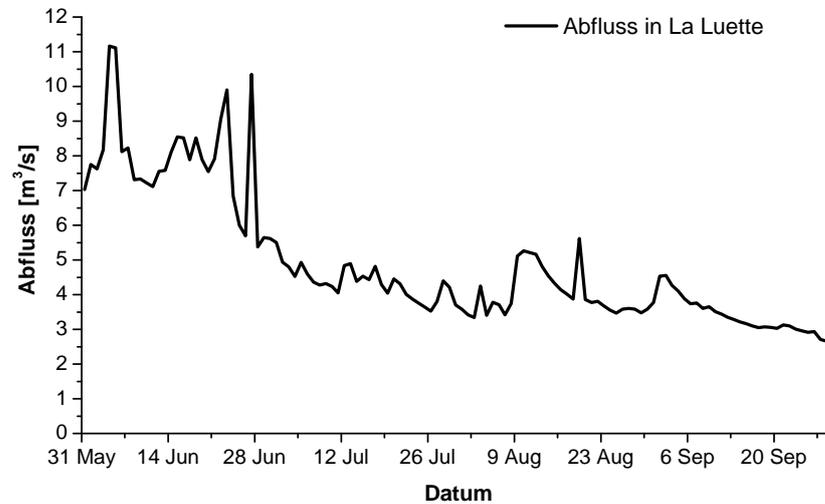


Abbildung 7.21: Abgezwigte Wassermenge (Tagesmittelwerte) aus dem Stausee in La Lurette.

Temperaturmessungen

Bei der Verzweigung in les Haudères wurden am 10. Juli drei Temperaturlogger installiert. Der erste misst die Temperatur der Borgne d’Arolla ca. 20 m vor dem Zusammenfluss mit der Borgne de Ferpèche. Der zweite Logger zeichnet die Temperatur in der Borgne de Ferpèche ebenfalls etwa 20 m vor dem Zusammenfluss mit der Borgne d’Arolla auf. Nach einer Mischungsstrecke von 50 m wurde ein dritter Logger nach dem Zusammenfluss in der Borgne installiert, der die Mischtemperatur aufzeichnet.

Wenn die Temperaturdifferenzen zwischen den zwei Zuflüssen genügend gross sind (mindestens 1°C [Bon98]), können aus der Mischtemperatur Erkenntnisse über die relativen Zuflussmengen gewonnen werden.

Zu Fehlinterpretationen kann es kommen, wenn sich das Wasser bis zum Logger nach dem Zusammenfluss nicht vollständig durchmischt hat. Bei normalem Wasserstand (Sommer) sollte die Bedingung für eine gleichmässige Durchmischung im vorliegenden Fall erfüllt sein. Bei sehr niedrigem Wasserstand (Winter) können Fehler auftreten, weil der Logger dann nicht mehr in der Hauptströmung liegt und nur noch von sehr wenig langsam fliessendem Wasser umgeben ist. Bei einer Messung am 15. Oktober, bei sehr niedrigem Wasserpegel, war die Temperatur am Rand (beim Logger) um 0.2°C höher als in der Flussmitte.

Während der meisten Zeit sind die aufgezeichneten Temperaturen der Logger in der Borgne d’Arolla und der Borgne de Ferpèche sehr ähnlich (Differenz kleiner als ein Grad). Dadurch zeigt die Temperaturmessung nach der Mischung der Zusammenfluss auch ähnliche Werte. Auf Grund dieser kleinen Differenz können keine Aussagen über die Verteilung der relativen Abflussmenge gemacht werden.

In den aufgezeichneten Daten hat es aber im Juni um den 24. und um den 28. zwei Phasen, während welchen die Temperaturen in der Borgne de Ferpèche

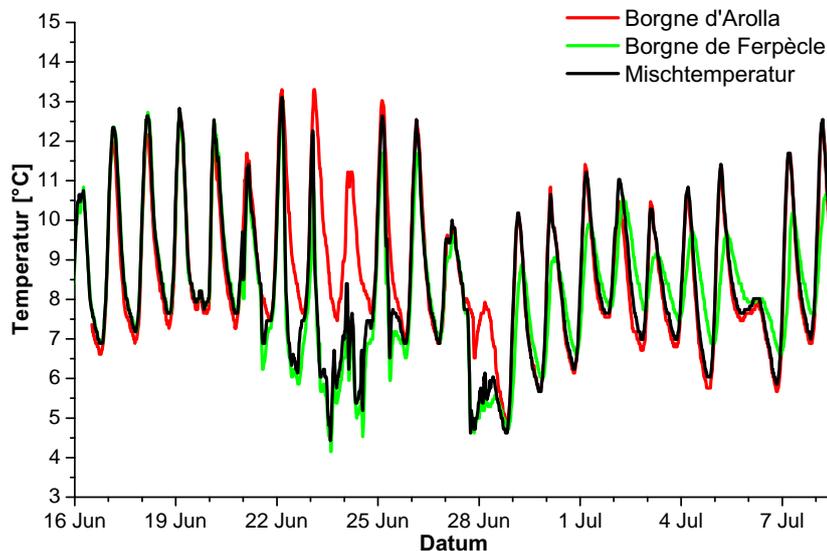


Abbildung 7.22: Wassertemperatur der Borgne, der Borgne d'Arolla und der Borgne de Ferpècle in les Haudères im Sommer 02.

deutlich tiefer sind als in der Borgne d'Arolla. Der Temperaturlogger nach der Mischung folgt in dieser Phase den Werten der Borgne de Ferpècle. Was zeigt, dass die Zuflussmenge der Borgne de Ferpècle während dieser Zeit grösser war. Am 24. und 28. Juni wurden auch in La Luette Abflussspitzen und bei der MeteoStation in Evolene-Villa grosse Niederschläge gemessen.

Warum sich die Abflussmengen nur in der Borgne de Ferpècle vergrössert, obwohl das Einzugsgebiet der Borgne d'Arolla etwas grösser ist (88.9 km^2 , gegen 70.4 km^2 [BWG01]), kann an der lokalen Niederschlagsverteilung (mehr Niederschlag im Val de Ferpècle) oder an den unterschiedlichen Kapazitäten der Wasserfassungen liegen. Die Fassung beim Stausee in Ferpècle ist mit einem Mengenbeschränker versehen, die das Wasser bei zu grossem Abfluss von der Anlage in den ursprünglichen Bach umleitet [Gra].

Ein weiterer Logger wurde nach dem Stausee am Ende dieser Strecke unterhalb von Euseigne installiert. Dieser Logger war bei kleinen Abflüssen nicht immer im Wasser, so dass ein Teil der Messungen nicht verwendet werden kann. Die besten Daten sind für den Untersuchungsbeginn im Juni und für September vorhanden.

Es ist schwierig, die Temperaturmessung von Les Haudères mit der Temperaturmessung am Streckenende zu vergleichen, weil bei der Wasserabzweigung im Stausee alles Wasser abgezweigt wird und alles Wasser unterhalb der Stauung von den seitlichen Zuflüssen nach dem Stausee stammt. Die Temperatur am Ende der Strecke war im September über 6°C wärmer als die Mischtemperatur in les Haudères und der Tagesgang hat sich von 2 auf 6°C vergrössert. An schönen Tagen im September betragen die Unterschiede der Tagesspitzen bis zu 10°C . Die Messungen sind in der Abbildung 7.23 dargestellt.

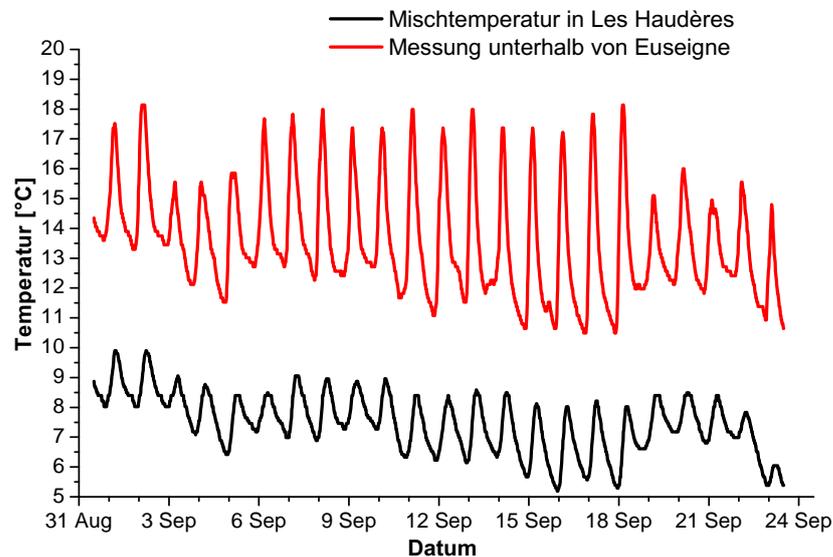


Abbildung 7.23: Wassertemperatur in der Borgne bei Les Haudères und unterhalb von Euseigne kurz vor dem Zufluss der Dixence während des Sommers 02.

Die Ursache für die grossen Unterschiede sind in der Fliessstrecke nach dem Stausee zu finden. Das Wasser nach dem Stausee fliesst durch ein enges, schattiges Tal. Danach fliesst das Wasser ca. 500 m durch eine grosse, breite Ebene. Auf Grund der geringen Fliessgeschwindigkeit verbleibt das Wasser relativ lange in dieser Gegend. Bei entsprechenden meteorologischen Bedingungen kann das Wasser hier stark erwärmt werden, da es wegen seines geringen Volumens wenig gedämpft auf klimatische Einflüsse reagiert.

Dazu kommt, dass das Wasser im unteren Abschnitt aus einem andere Einzugsgebiet stammt, wo der hydrologischen Hintergrund verschieden ist (tiefere mittlere Einzugsgebietshöhe, geringe Vergletscherung).

Weitere Messungen

Auch die punktuellen Temperaturmessungen zeigen die höhere Temperatur nach der Staumauer.

Auf Grund der Abflussabnahme verringert sich auch die Breite des Bachbetts. Vor dem Stausee beträgt die Breite etwa 8 m, danach noch 2 m, in der Ebene am Schluss sind es dann etwa 5. Die auf der Strecke durchgeführten Messungen sind im Anhang A in der Tabelle A.4 aufgeführt.

In der Abbildung 7.24 kann man den Unterschied vor und nach der Staumauer anhand zweier Fotos ersehen.



Abbildung 7.24: Borgne vor (links) und nach (rechts) der Stauung in La Luette (Foto: 16.10.02).

7.2.3 Streckenabschnitt Euseigne-Bramois

Der letzte Untersuchungsabschnitt erstreckt sich von Euseigne 710 (müM) nach Bramois (490 müM), misst 8700 m und überwindet dabei 220 Höhenmeter. Die Strecke beginnt nach dem Zufluss der Dixence aus dem Val d'Hérémence und endet beim Einfluss in die Rhône. Im ersten Teil fließt die Borgne hier durch ein enges Tal (Foto in der Abbildung 7.25) und das Gefälle beträgt ungefähr 5%. Die letzten 3 km, in der Rhôneebene vor der Rhône-Mündung gelegen, sind grösstenteils kanalisiert und verlaufen flach (ca. 2% Gefälle).

Der wichtigste hydrologische Einfluss auf diesem Flussabschnitt ist der Zufluss des Kraftwerks (kurz vor Bramois) in die Borgne (vergleiche Abbildung 7.17). Daneben gibt es einige kleinere, für den Temperaturhaushalt der Borgne aber bedeutsame Zuflüsse.

Abfluss

Zu Beginn ist die Strecke Euseigne-Bramois hydraulisch vor allem durch die Abflussmenge der Dixence geprägt. Die Abflussmenge der Dixence betrug bei den Traceraufnahmen zwischen 80 und 100 l/s, während die Wassermenge in der Borgne nur zwischen 7 und 20 l/s variierten.

Auch die Dixence ist ein hydroelektrisch genutzter Fluss. Neben der Stauung im Lac de Dix wird der Dixence auch unterhalb von Leteygeon Wasser entnommen (im Sommer etwa $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$) und in einem kleinen Kraftwerk in Sauterot turbinert [Sol02]. Nach der Rückleitung bei Sauterot befindet sich direkt danach eine weitere Wasserfassung, welche Wasser für das Kraftwerk Bramois abzweigt (im Sommer etwa $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$) (Vergleiche das Schema in der Abbildung 7.18).

Nach dem Zusammenfluss der beiden Flüsse beträgt der Abfluss der Borgne etwa 10% des natürlichen Abflusses [Amt68]. Bis nach Bramois vor dem Kraft-



Abbildung 7.25: Borgne zwischen Euseigne und Bramois (Foto: 8.10.02).

werk wird der Abfluss der Borgne durch kleinere seitliche Zuflüsse wieder etwas vergrößert (auf 20% des natürlichen Abflusses).

Der wichtigste Zufluss der Borgne ist auf dieser Strecke die Rückleitung aus dem Kraftwerk in Bramois. Die mittlere Wassereinführung des Kraftwerkes während des Sommers 02 (Mai bis September) betrug $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nach dem Kraftwerk beträgt die Abflussmenge der Borge wieder etwa 50% des natürlichen Zustandes.

Temperaturmessungen in Euseigne

Die drei Logger am Zusammenfluss der Borgne mit der Dixence sind wie folgt angeordnet: der erste Logger befindet sich in der Dixence 5 m vor der Mündung in die Borgne, ein weiterer Logger misst die Temperatur in der Borgne 20 m vor dem Zufluss der Borgne und der dritte Logger misst die Temperatur nach einer Mischstrecke von 20 m. Die Messungen sind in der Abbildung 7.26 dargestellt.

Die gemessene Temperatur ist in der Dixence tiefer als in der Borgne. Wobei die Unterschiede an schönen Tagen am ausgeprägtesten sind. Im September betrug die Differenz der mittleren Temperaturen $2.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Ein Grund für die tiefen Temperaturen in der Dixence ist der Wassereinfluss des Kraftwerkes Leteygeon-Sauterot. Der Kraftwerkseinfluss befindet sich etwa 1.5 km vor dem Einfluss in die Borgne. Ein Teil des Wasser wird zwar kurze Zeit später wieder für die Produktion in Bramois abgezweigt. Auf die Temperatur hat dies nach einer guten Durchmischung aber keine Auswirkungen. Bei einer Messung vor Ort, wurde am 16. Oktober 02 um 16:30 im Kraftwerksausfluss eine Temperatur von

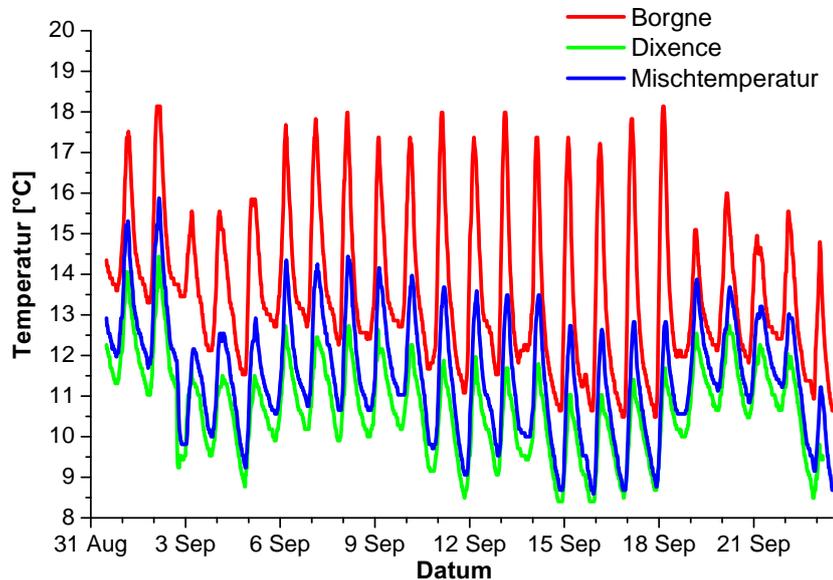


Abbildung 7.26: Wassertemperatur in der Borgne vor und nach (Mischtemperatur) dem Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne im Sommer 02.

7.5°C gemessen, vor dem Ausfluss betrug die Temperatur in der Dixence 9.4°C.

Die Werte der Mischtemperaturen liegen zwischen diesen beiden Messungen. Auf Grund des grösseren Abflusses in der Dixence wird die Temperatur beim Logger etwas mehr durch die Dixence geprägt. Wenn man die Temperaturen zum Berechnen der Abflussverhältnis benützt, beträgt des Verhältnis Dixence/Borgne etwa 7:3.

Kraftwerk Bramois

Das Kraftwerk Bramois befindet sich 530 müM kurz vor Bramois. Im Kraftwerk wird das in la Luette aus der Borgne, plus das in Sauterot gefasste Wasser aus dem Fluss Dixence turbinert (über eine Druckleitung von Vex). Foto der Einleitung in die Borgne in der Abbildung 7.27.

Bei diesem Kraftwerk handelt es sich um ein Laufkraftwerk. Das in den Flüssen gefasste Wasser kann nicht gespeichert werden, so dass permanent turbinert wird. Die Ausflussmenge des Kraftwerkes variiert aus diesem Grund mit dem natürlichen hydraulischen Abfluss. Die Tagesabflussmittelwerte sind in der Abbildung 7.28 dargestellt [Jor02].

Rund 80% des Wasser kommt von La Luette, 20% von Sauterot. Bei den Messwerten in La Luette wurden auch die Tagesminima und Maxima bestimmt. Die Abweichung der Minima vom Tagesmittel betruhen im Sommer 02 im durchschnitt 7%, die Abweichung der Maxima 15%.

Die Temperatur beim Kraftwerksausfluss müsste etwa der Temperatur bei den Wasserfassungen in La Luette und Sauterot entsprechen. Am 8. Oktober



Abbildung 7.27: Wassereinleitung beim Kraftwerk in Bramois (Foto: 9.10.02).

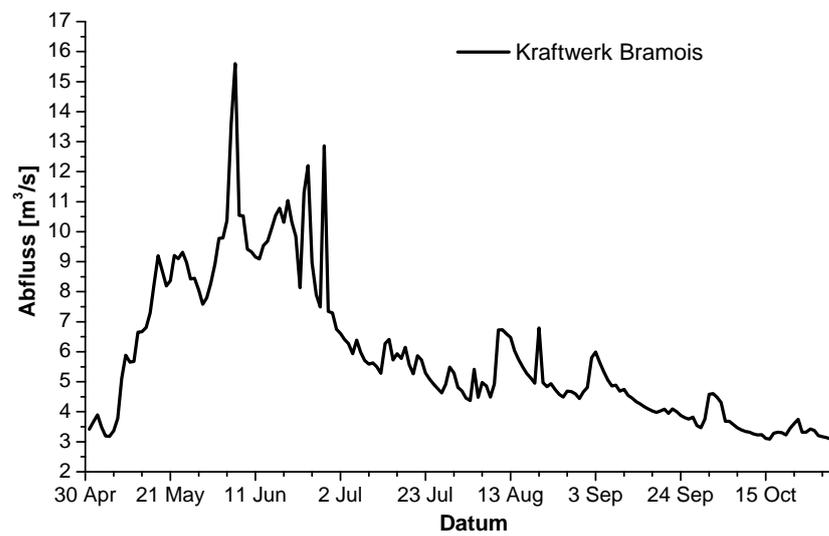


Abbildung 7.28: Mittlerer Tagesabfluss des Kraftwerks Bramois während des Sommers 02.

um 13:00 betrug die Temperatur im Ausfluss 5.1°C.

Die Auswirkungen der Einleitung auf die Temperatur der Borgne kann an-

hand der Temperaturdaten der Logger vor der Mündung in die Rhône analysiert werden (Abbildung 7.29). Dabei werden die Temperaturmessungen in Euseigne nach dem Einfluss der Dixence mit den Daten des letzten Loggers verglichen. Der letzte Logger befindet sich in etwa 3 km nach dem Kraftwerkseinfluss, unmittelbar bevor die Borgne in die Rhône mündet.

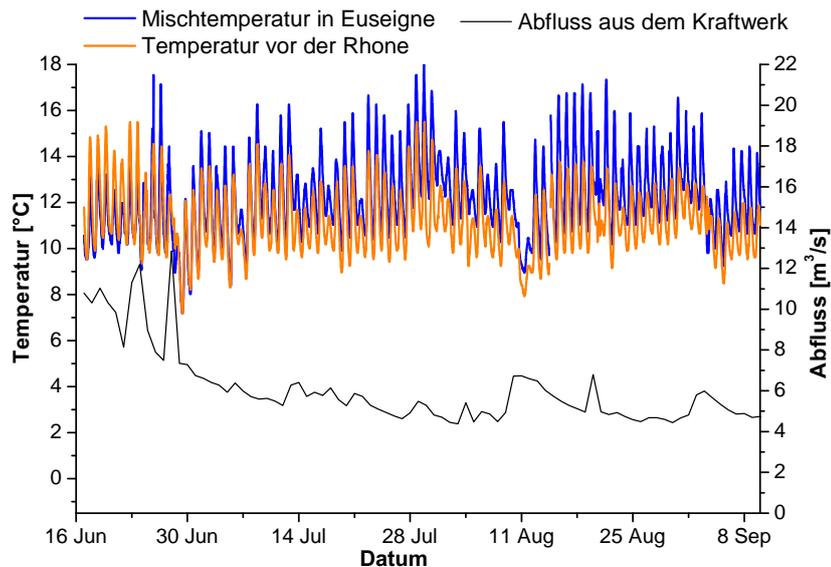


Abbildung 7.29: Wassertemperatur der Borgne in Euseigne und in Bramois vor der Mündung in die Rhône und die mittlere tägliche Einleitung des Kraftwerkes in Bramois im Sommer 02.

Bei einem natürlichen Abflussregime nimmt im Sommer die Temperatur eines Flusses normalerweise mit abnehmender Höhe zu. Durch den Einfluss des Kraftwerks sieht dieser Zusammenhang bei der Borgne anders aus. Die Temperaturen bei der Rhône-Mündung sind am Tag um 2°C, in der Nacht um 1°C tiefer als in Euseigne.

Diese Abkühlung wird durch die Einleitung des Kraftwerks in Bramois verursacht. Da das hydraulisch genutzte Wasser ab der Wasserfassung praktisch nicht mehr erwärmt wird (keine Einstrahlung und nur wenig Reibung), ist es deutlich kühler als das Wasser im natürlichen Bachbett.

Wenn man die Temperaturkurven mit den Zuflussmengen aus dem Kraftwerk vergleicht, erkennt man, dass bei grösseren Abflüssen (am 26.6, 28.6, 10.8, 11.8, 24.8) auch tiefere Temperaturwerte vor der Rhône gemessen werden (gut zu sehen am 26.6 und am 10.8). Diesen Zusammenhang kann aber nicht nur mit dem grössern Ausfluss über die Kraftwerke erklärt werden, da die Temperaturen vor dem Kraftwerk auch tief sind. Diese grösseren Abflüsse sind eine Folge von Niederschlagsereignissen: an diesen Tagen war der Himmel stark bedeckt und es erfolgte nur eine geringe Erwärmung der Wassers.

Weitere Messungen

Auf dieser Strecke fällt vor allem ein Wasserzufluss auf: Bei Combioula 2 km nach dem Zufluss der Dixence tritt Wasser aus dem Berg in ein Wasserbecken aus Steinen und läuft von dort in die Borgne. Die Temperatur dieses Wasser war an den Messtagen (9. und 16.10.02) über 25°C. Die Abflussmenge betrug etwa 20 l/s. Wegen der kleinen Abflussmenge der Borgne vermag dieser Wärmewasserinput diese stark zu erwärmen (über 3°C). Weitere Messungen sind im Anhang A in der Tabelle A.5 wiedergegeben.

Rückleitung in die Rhône

Das in Bramois in die Rhône geleitete Wasser entspricht nur 50% der natürlichen Abflussmenge der Borgne. Das restliche Wasser wird im Stausee Lac de Dix gespeichert, von wo es hauptsächlich im Winter genutzt und dann direkt in die Rhône geleitet wird (bei den Kraftwerken Chandoline und Bieudron/Nendaz).

Bei den Kraftwerksausflüssen wurden im Rahmen des Rhôneprojektes ebenfalls Temperaturlogger installiert. Auf Grund des Ausfalls eines Loggers wurde im Sommer 2002 nur die Temperatur in Chandoline erfasst. Da das Wasser vom gleichen Ort kommt (bei Nendaz mit einem Umweg über Fionnay) unterscheiden sich die Temperaturen der beiden Wassereinleitungen nicht sehr gross. In der Abbildung 7.30 sind die gemessenen Werte für die Einleitung von Chandoline aufgezeichnet.

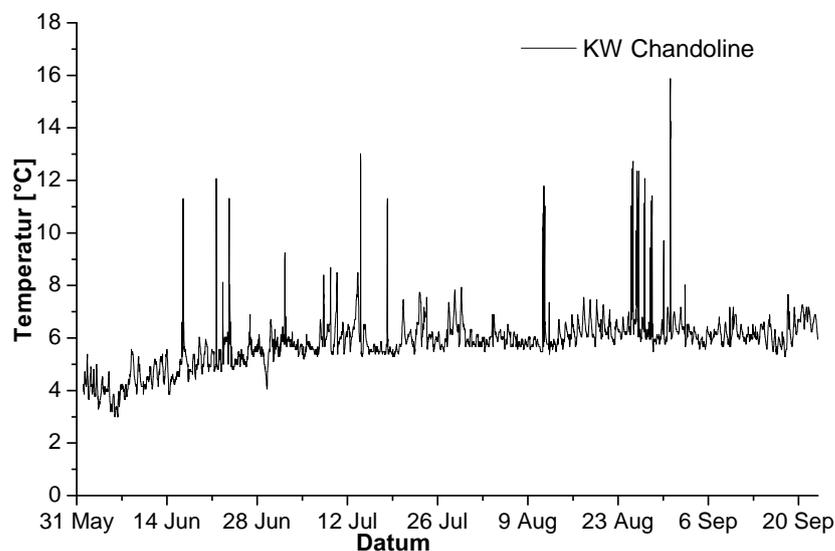


Abbildung 7.30: Wassertemperatur der Einleitung des Kraftwerks Chandoline während des Sommers 02. Die erhöhten Werte sind Aufzeichnungen während Zeitpunkten in welchen das Kraftwerk kein Wassert turbinierete und der Logger deshalb die Temperatur des stehenden Wasser oder der Luft aufzeichnete.

Die Temperatur der Einleitung ist tief und bewegt sich konstant um die 6°C.

Die vereinzelt Messwert mit einer höheren Temperatur sind Aufzeichnungen in Momenten, in welchen kein Wasser turbinert wird.

Verglichen mit der mittleren Temperatur der Borgne bei der Mündung ist die Temperatur des Kraftwerkszuflusses während der Untersuchungsperiode im Sommer etwa 5°C kälter.

Kapitel 8

Eichung des Modells

Die Modellierung erfolgt mit dem an der EAWAG von Peter Reichert entwickelten Computerprogramm Aquasim [Rei98b, Rei98a, EAW].

Bei der Modellimplementierung werden zuerst die im Feld gemessenen geometrischen Flussbeteigenschaften und die Abflussverhältnisse in das Modell eingegeben (Kapitel 4). Um die hydraulischen Eigenschaften des Flusses zu eichen, werden dann die Tracermessungen mit dem Modell erfasst.

In einem zweiten Schritt wird das hydraulische Modell durch die Wärmehaushalt-Prozesse erweitert (Kapitel 5). Für die Simulation des Temperaturregimes müssen die äusseren klimatischen Bedingungen und die Sedimenteigenschaften bekannt sein. Als klimatische Randbedingungen werden die Wetterdaten der Messstationen der MeteoSchweiz verwendet. Die gemessenen Wassertemperaturen werden zur Eichung der unbekannt Parameter des Wärmemodells benötigt.

Wegen der begrenzten Messdatenmenge und der Komplexität des hydraulischen Regimes der Borgne wurde entschieden, die Modellierungen am Beispiel der Lonza durchzuführen.

8.1 Numerik

Bei der Simulation werden die Differentialgleichungen für die Berechnung diskretisiert. Dabei werden die Resultate durch die numerische Dispersion etwas verfälscht. Wenn die Diskretisierung zu grob gewählt wird, können diese Auswirkungen ins Gewicht fallen. Um die numerische Dispersion gegenüber den anderen Fehlern des Modells vernachlässigen zu können, muss der Abstand zwischen den Berechnungspunkten genügend klein gewählt werden. Ein zu kleiner Abstand ist aber auch nicht vorteilhaft, da dadurch der Rechenaufwand grösser wird.

Dass die numerische Dispersion keine Rolle spielt, kann man prüfen, indem man die Simulation mit unterschiedlichen Anzahl Gitterpunkten durchrechnen lässt. Wenn man ausserhalb des Bereiches ist, in welchem die numerischen Dispersion einen Einfluss hat, verändern sich die Resultate nicht.

Für die Modellierung wird die Lonza in verschiedene Abschnitte gegliedert. Massgebend für die Unterteilung sind die Standorte der Temperaturlogger (Kapitel 7). Als erstes wird der Abschnitt Blatten-Kippel modelliert, als zweites folgt

die Strecke zwischen Gampel und der Rhône und am Schluss wird die Restwasserstrecke von Ferden nach Gampel betrachtet. Der Abschnitt mit dem Stausee zwischen Kippel und Ferden wird bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Bei den Modellierungen wird die Sommersituation vom 30. August bis zum 23. September 02 nachgebildet. Eine Modellierung zu einem früheren Zeitpunkt ist auf Grund der noch nicht vorhandenen Temperaturmessung nicht möglich. Die Modellierung wird über 25 Tage durchgeführt, um eine repräsentative Zeitspanne abzudecken. Als Zeitschritt für den Output werden 20 Minuten gewählt. So lassen sich die Resultate der Simulation gut mit den gemessenen Temperaturwerten vergleichen, die ebenfalls im 20 Minutenrhythmus aufgezeichnet wurden.

8.2 Blatten-Kippel

Da das Abflussregime der Lonza in diesem Abschnitt weitgehend den unbeeinflussten Bedingungen entspricht, eignet sich dieser Abschnitt gut, um zu testen, ob das Modell in der Lage ist, den Wärmehaushalt bei hohem Abfluss korrekt vorauszusagen.

8.2.1 Hydraulik

Die Länge und das Gefälle der Strecke sowie die geographische Lage wurden aus der elektronischen Landeskarte der Schweiz (Massstab 1:50'000) bestimmt.

Dank der BWG Station in Blatten verfügt man in diesem Abschnitt über gute hydraulische Startdaten. Die Summe der seitlichen Zuflüsse kann aus der Differenz der Messung in Blatten mit dem ebenfalls bekanten Zufluss in den Stausee errechnet werden. Bezüglich Verteilung wird angenommen, dass die Zuflüsse gleichmässig über die Fliessstrecke von Blatten bis zur Staumauer einmünden.

Da das Ziel der Modellierung dieses Abschnittes nicht darin bestand, Szenarien mit stark veränderten hydraulischen Eigenschaften zu simulieren (der Abfluss entspricht schon den natürlichen Bedingungen), wurden die hydraulischen Eigenschaften in diesem Abschnitt nur grob erhoben.

Eine Korngrössenanalyse zur Bestimmung des Reibungswiderstandes konnte in diesem Abschnitt wegen der reissenden Strömung nicht durchgeführt werden. Auf eine Implementierung einer Totzone wird deshalb verzichtet, da bei der Schätzung des Reibungswiderstandes und der Totzonenparameter Identifikationsprobleme entstehen. Die durch die Totzonen verursachte Dispersion wird grob mit der empirischen Dispersionsgleichung (Kapitel 4 Formel 4.18) berücksichtigt. Die Aussagekraft des Modells bezüglich des Stofftransports mit grossen Konzentrationsgradienten wird durch diese Vereinfachung zwar limitiert, für die Simulation des Temperaturregimes fällt diese Vernachlässigung nicht ins Gewicht, da die Auswirkung der Dispersion auf die nur langsam ändernde Temperatur klein ist. Zudem gibt es auf diesem Streckenabschnitt nur wenige typische Poolzonen.

Zur Abschätzung des Reibungswiderstandes wurde in Kippel ein Tracerversuch durchgeführt. Durch Anpassung der simulierten Tracerkurve an die gemessenen Werte konnte ein Reibungsfaktor f von 1.2 bestimmt werden (Abbildung 8.1). Mit diesem Wert konnte das Eintreffen des Tracers gut simuliert werden; nicht damit nachgebildet wird das durch die Totzonen verursachte Ende.

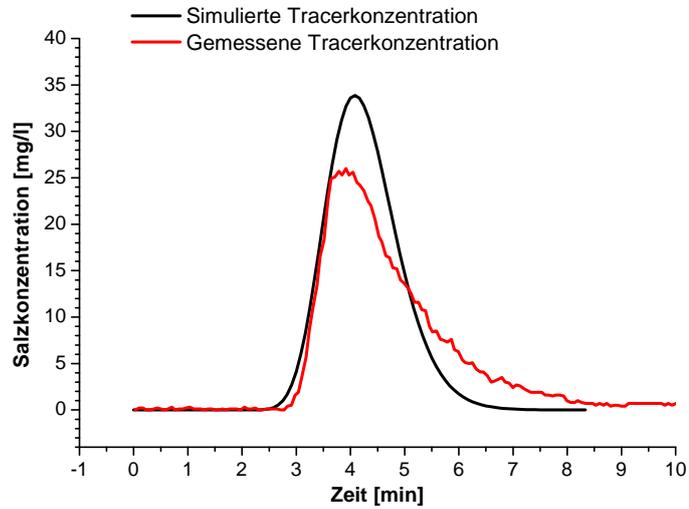


Abbildung 8.1: Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Kippel.

Eine Auflistung aller für diesen Abschnitt verwendeten hydraulischen Daten mit Schätzungen für die Standardabweichungen ist in der Tabelle 8.6 zu finden.

Parameter	Variable	Größen	Standardabweichung	Quelle
Länge	x	4283 m	50 m	Karten
Gefälle	S_0	4%	0.1%	Karten
Wasserinput	Q	3-18 m ³ /s	0.5 m ³ /s	BWG
laterale Zuflüsse	q_{lat}	0.0001-0.001 m ² /s	0.0001 m ² /s	BWG/KW
Bachbettbreite	w_{bed}	14 m	2 m	Abschätzung
Böschungswinkel	α	40°	20°	Abschätzung
Reibungskoeffizient	f	1.2	0.5	Tracerversuch
Dispersionsfaktor	ϕ	0.04	0.2	Tracerversuch

Tabelle 8.1: Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Blatten-Kippel.

8.2.2 Wärmehaushaltmodell

Im Wärmehaushaltsmodell werden als Randbedingungen die Meteodaten der Atmosphäre, Temperatur, Druck, relative Feuchtigkeit, Globalstrahlung und Wolkenbedeckung, benötigt.

Um die Ortsabhängigkeit (insbesondere die Höhenabhängigkeit) der meteorologischen Bedingungen zu beschreiben, braucht es mehr als eine Messstation. Neben der Meteostation in Blatten wird als zweiter Referenzstandort die Wetterstation in Visp verwendet. Visp liegt in der Rhôneebene 10 km östlich der

Lonzamündung. Durch diese zwei Stationen sind die Flussstrecken am oberen und am unteren Ende gut abgedeckt und die Höhenabhängigkeit kann gut modelliert werden.

Der Luftdruck wird in Blatten nicht gemessen. Da die Höhenabhängigkeit des Druckes aber gut bekannt ist, kann der Druck entlang des Flusses mit der barometrischen Höhenformel berechnet werden.

Bei der Messung der Bewölkung ist die Höhenabhängigkeit weniger wichtig als der Standort der Station. Die Messstation sollte sich im gleichen Tal wie der Fluss befinden. Deshalb werden für die ganze Strecke von Blatten bis Ferden die Bewölkungsdaten von Blatten verwendet.

Die Globalstrahlung wird in Blatten nicht gemessen. Wie im Abschnitt 5.3.2 erwähnt, ist die Höhenabhängigkeit bei der Solarstrahlung aber ein wichtiger Faktor. Deshalb musste eine weitere Referenzstation gesucht werden. In Frage kommende Meteostationen befinden sich in Montana, Sion, Fey, Evolène-Villa, Adelboden und Ulrichen. Ausgewählt wurde die Station in Montana, da sie in einer ähnlicher Höhe (1508 müM) wie Blatten (1535 müM) liegt. Zudem liegen beide Stationen nördlich der Rhôneebene. Unterschiede zwischen den beiden Stationen gibt es bezüglich der Ausrichtung: während Blatten in einem Seitental liegt, befindet sich Montana direkt am Nordhang des Rhônetals.

Die unbekannt Parameter: der Wärmeaustauschkoefizient K , die Beschattung k_B , der Anteil der ins Sediment gelangten kurzwelligigen Strahlung f_s und die Sedimenteigenschaften k_{sed} , werden durch Anpassung des Modells an die gemessenen Temperaturwerte geschätzt.

Ein weiterer geschätzter Parameter ist der Windfaktor. Die Windstärke wird zwar bei den Wetterstationen erfasst, die Messgeräte befinden sich in der Regel aber an einer exponierten Stelle, so dass die gemessenen Verhältnisse nur bedingt mit den Begebenheiten beim Bachbett übereinstimmen. Um dies zu berücksichtigen, werden die gemessenen Windstärken mit einem konstanten Faktor f_A zwischen 0 und 1 gewichtet. Dieser Faktor wird ebenfalls aus den gemessenen Temperaturwerten abgeschätzt.

Bei den Parameterschätzungen wird Wert darauf gelegt, dass sich die geschätzten Parameter im realistischen Rahmen bewegen. Insbesondere die Beschattung kann zur Kontrolle gut mit den Beobachtungen im Feld verglichen werden.

Ein wichtiger Eingabeparameter stellt die Initialtemperatur des Sediments dar. Die Anfangstemperatur des Sediments bestimmt die Richtung des Energieflusses zwischen dem Gewässer und dem Sediment. Die Sedimenttemperatur ist eine dynamische Variable, die sich an die Austauschprozesse anpasst. Da das Sediment in der Regel eine grosse Wärmekapazität hat, erfolgt diese Anpassung langsam. Wenn die Anfangstemperatur des Sediments zu hoch gewählt wird, wirkt das Sediment bis zur Anpassung als unrealistische Wärmequelle. Wird die Starttemperatur zu tief gewählt, wirkt das Sediment als eine Temperatursenke. Die Sedimenttemperatur ist in einem natürlichen Bach über den Tag gemessen relativ konstant. Während des Tags nimmt das Sediment normalerweise vom Fluss Wärme auf, in der Nacht gibt es die gespeicherte Energie wieder an das Wasser ab. Das Sediment verringert so die Amplitude zwischen den Tages- und Nachtspitzen der Wassertemperatur. Neben dem täglichen Speicher, bildet das Sediment auch einen saisonalen Speicher, der im Winter mehr Wärme abgibt und im Sommer mehr Wärme aufnimmt.

Beim Modell wird die Anfangstemperatur des Sedimentes so gewählt, dass

die Sedimenttemperatur in den ersten Tagen der Simulation sich im Mittel nicht stark verändert und das Sediment während des Tags Energie speichert und diese in der Nacht wieder abgibt. Damit ist sichergestellt, dass die Sedimenttemperatur sich im Gleichgewicht mit der Temperatur im Fluss befindet. Nach den ersten Tagen, wenn die Wassertemperatur nicht konstant bleibt, kann es sein, dass sich auch die Sedimenttemperatur etwas verändert und damit der saisonale Speichereffekt aktiv wird. Speichereffekte vor Simulationsbeginn werden jedoch nicht berücksichtigt.

Die Initialtemperatur des Sediments ist nicht über den ganzen Flussverlauf konstant. Im Modell wird die Temperatur am Anfang und am Ende der Strecke angepasst. Auf der Strecke dazwischen wird ein konstanter Gradient angenommen. Die Initialtemperaturen des Sediments werden durch mehrmaliges Durchlaufen der Simulation empirisch angepasst.

Die tabellarische Auflistung aller selbst bestimmten Parameter für das Wärmehaushaltsmodell ist in der Tabelle 8.2 zu finden. Die restlichen benötigten Konstanten wurden bereits im Kapitel 5 eingeführt.

Parameter	Vari- able	Größen	Standard- abweichung	Quelle
Beschattung	k_B	0.1	0.2	P.schätzung
geographische Breite	LA	46.4°	0.1°	Karte
geographische Länge	LO	7.8°	0.1°	Karte
Sediment- eigenschaften	k_{sed}	$2 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	$2 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	P.schätzung
Wärmeaustausch- koeffizient	K	60 W/K/m^2	30 J/K/m^2	P.schätzung
Anteil kurzweiliger Strahlung ins Sediment	f_s	0.1	0.1	P.schätzung
Windfaktor	f_A	1	0.5	P.schätzung
Initialtemperatur des Sediments	T_{Sini}	Start: 6.7°C Ende: 7.6°C	0.5°C 0.5°C	Anpassung Anpassung
Zuflusstemperatur	T_{lat}	$T_W + 2^\circ\text{C}$	2°C	Anpassung

Tabelle 8.2: Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Blatten-Kippel im Sommer 02.

Die geschätzten Parameter bewegen sich in vernünftigen Größenordnungen und sind mit denen von Meier vergleichbar. Einzig die Beschattung fällt etwas klein aus. (Foto des Flussabschnittes im Kapitel 7 in der Abbildung 7.2)

8.2.3 Resultate

Dem Modell gelingt es trotz der geringen Beschattung ($k_B=0.1$) zuerst nicht, die ganze Erwärmung auf der Strecke zu erklären. Im Mittel sind die berechneten Temperaturen deutlich zu tief. Eine Erklärung für die zu tiefen Temperaturen kann sein, dass die Temperaturen der Zuflüsse höher sind als die Temperatur im Hauptfluss, da sie aus weniger vergletscherten Einzugsgebieten kommen. (Die Zuflüsse zwischen Blatten und Kippel machen etwa 20 % der Wassermenge in Kippel aus.) Da nicht im ganzen Flussabschnitt eine Begehung durchgeführt wurde, kann auch ein einzelner warmer Zufluss (sei er künstlich oder natürlich)

nicht ausgeschlossen werden. Um eine bessere Anpassung an die gemessenen Temperaturwerte zu erhalten, werden die Zuflüsse mit einer konstant um 2°C wärmeren Temperatur als die Lonza an den Einleitstellen modelliert. Da von den Zuflüssen keine Temperaturmessungen vorliegen, kann diese Annahme nicht überprüft werden.

Mit dieser Anpassung kann die Nachbildung der simulierten an die gemessenen Temperaturen gut vorgenommen werden. Die Resultate sind in der Abbildung 8.2 dargestellt.

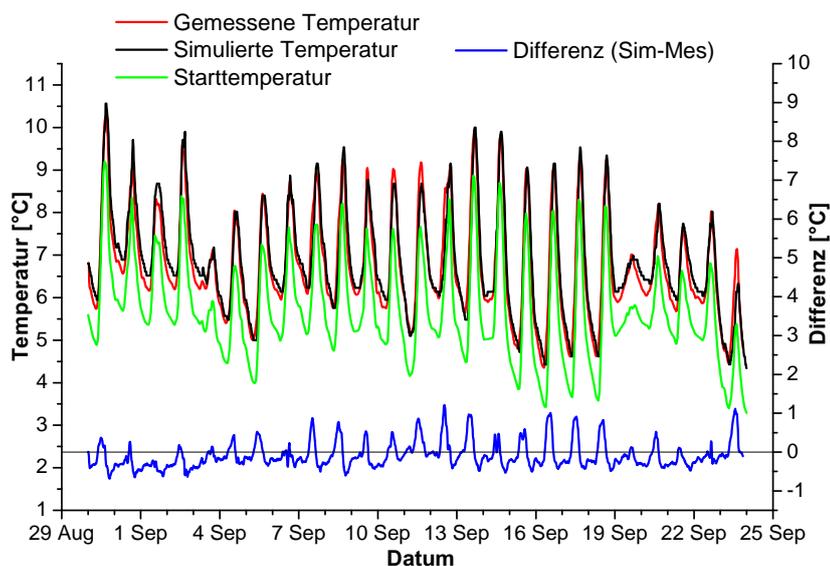


Abbildung 8.2: Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Kippel, Starttemperatur in Blatten, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.

Insgesamt sind die simulierten Temperaturen nur 0.1°C zu tief, die Abweichungen variieren stark im Verlauf des Tages, so werden im Verlauf des Vormittags zu hohe Temperaturen simuliert (bis zu 1.2°C). Diese positiven Abweichungen können mit der Solarstrahlung erklärt werden. Die verwendeten Werte stammen von der Wetterstation in Montana und Visp. In der Höhenlage dieser Strecke ist vor allem die Station in Montana massgebend. Da diese Station in Montana im Osten weniger durch die Berge beschattet wird, führt die Übertragung zu einer zu grossen Solarstrahlung in den Morgenstunden und somit zu einem zu frühen Anstieg der errechneten Wassertemperatur auf der Strecke.

Auf die weiteren Unsicherheitsfaktoren wird bei der Sensitivitätsanalyse im Abschnitt 8.5 noch einmal eingegangen.

Die Energieflüsse für den Standort Kippel sind in der Abbildung 8.10. aufgezeichnet.

Die wichtigste Wärmequelle in Kippel ist die langwellige Einstrahlung mit einem Mittelwert von $300 \text{ W}/\text{m}^2$. Dieser Wärmefluss korreliert mit der Tempera-

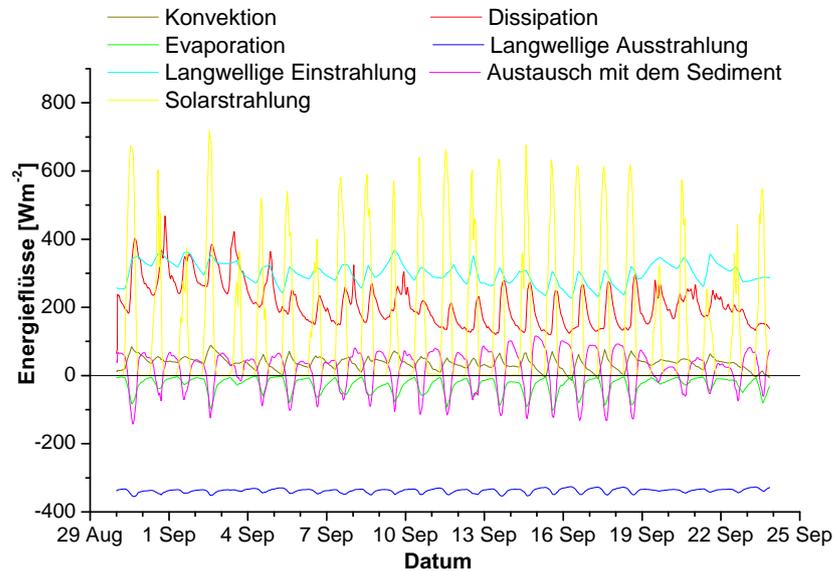


Abbildung 8.3: Die im Modell berechneten Energieflüsse der Lonza im Flussabschnitt von Blatten nach Kippel im Sommer 02 (aufgezeichnet für den Standort Kippel).

tur der Atmosphäre in der vierten Potenz. Aufgrund der Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht hat auch die langwellige Einstrahlung einen Tagesgang mit Variationen von 40 bis 60 W/m^2 .

Nicht nur die Atmosphäre, auch das Wasser strahlt Energie im langwelligen Bereich ab. Der Mittelwert der Abstrahlung beträgt 340 W/m^2 . Da die Tagesamplitude der Temperatur im Wasser kleiner ist als in der Luft, ist auch der Tagesgang des Energieflusses geringer (Variation 10 bis 20 W/m^2).

Ein wichtiger Energieterm für die Erwärmung ist die nur während des Tages aktive Solarstrahlung. Ihr Mittelwert beträgt 150 W/m^2 , während des Sonnenhöchststands (12 Uhr Normalzeit ca. 13 Uhr Sommerzeit) werden Werte bis zu 700 W/m^2 simuliert.

Die Dissipation (Freisetzung von Reibungsenergie) führt ebenfalls zu einer Erwärmung. Die Variation der Dissipation ist eine Folge des variierenden Abflusses, da die Energie auf die Flussbreite normiert wird. Bei höherem Abfluss steigt die Reibungsenergie wegen der höheren Masse. Die Flussbreite nimmt zwar auch etwas zu, im Verhältnis aber weniger stark als die Wassermenge. Bei den absoluten Werten der Dissipation muss man beachten, dass diese stark vom Gefälle abhängig ist. Wird die Dissipation an einer anderen Stelle im Abschnitt mit einem grösseren Gefälle dargestellt, vergrößert sie sich entsprechend. In Kippel, am Ort der Abbildung, ist das Gefälle klein. In den steilsten Abschnitten auf dieser Strecke ist das Gefälle fast dreimal so hoch. Dementsprechend ist auch die durch die Dissipation eingetragene Energie in diesen Abschnitten dreimal so gross.

Der Wasseraustausch mit dem Sediment ist ein wichtiger Vorgang, der die kleinen Tagesschwankungen der Wassertemperatur erklärt. Während des Tages nimmt das Sediment Wärme auf, welche es in der Nacht wieder abgibt. Über die ganze Untersuchungsperiode betrachtet, gibt das Sediment etwas Wärme an den Fluss ab (Mittelwert 15 W/m^2). Dies führt zu einer leichten Abkühlung der Sedimenttemperatur.

Die Konvektion und die Evaporation spielen dagegen für den Temperaturhaushalt eine untergeordnete Rolle. Die Konvektion führt zu einer leichten Erwärmung, die Evaporation zu einer leichten Abkühlung. Die beiden Prozesse heben sich auch im Tagesverlauf in etwa auf.

8.3 Gampel-Rhône

Dieser Abschnitt wird hauptsächlich durch die intermittierende Einleitung des kalten Wassers aus dem Kraftwerk in die kleine, warme Restwassermenge geprägt.

8.3.1 Hydraulik

Die Länge, das Gefälle und die geographische Lage dieser Strecke wurden wiederum aus der elektronischen Landeskarte der Schweiz (Massstab 1:50'000) bestimmt.

Die turbinierten Wassermengen des Kraftwerks in Gampel-Steg stehen mit stündlichen Messungen zur Verfügung. Bezüglich des Zuflusses von der Restwasserstrecke stehen punktuelle Messungen zur Verfügung. Das Wasser in der Restwasserstrecke bei Gampel setzt sich aus der kleinen Dotation und dem allfälligen Überfluss aus dem Stausee und den seitlichen Zuflüssen zwischen Ferden und Gampel zusammen. Die Abflussmengen des Stausees sind bekannt. Die seitlichen Zuflüsse müssen abgeschätzt werden, indem angenommen wird, dass das Verhältnis der totalen Zuflussmengen der seitlichen Bäche zwischen Ferden-Gampel und Blatten-Ferden ungefähr konstant sind. Das bedeutet: ist der seitliche Zufluss zwischen Blatten und Ferden gross, ist auch von den seitlichen Zuflüssen auf der Strecke Ferden-Gampel eine gross Wassermenge zu erwarten.

Das Verhältnis x_{Anteil} (Zuflussmenge Blatten-Ferden geteilt durch Zuflussmenge Ferden-Gampel) wird aus den Temperaturmessungen in Gampel (Restwasser, Kraftwerk und Mischtemperatur bei der Mündung in die Rhône) abgeschätzt. Dies ist möglich, weil sich die Temperaturwerte der beiden Inputflüsse bei Gampel (Kraftwerkaustritt und Restwasser) stark unterscheiden und die genauen Abflussdaten des Kraftwerks bekannt sind. Um auch die Veränderung der Temperatur auf der Strecke bis zur Mischtemperatur zu berücksichtigen, wird x_{Anteil} direkt mit dem Wärmehaushaltmodell geschätzt. Die Vorgehen zur Abschätzung der Wassermenge am Ende der Restwasserstrecke in Gampel wird mit der Formel 8.1 beschrieben.

$$\begin{aligned}
 Q_{Gampel} &= Q_{Restwasser} + x_{Anteil} Q_{Zu,BF} & (8.1) \\
 Q_{Gampel} &: \text{Abfluss vor Gampel } [m^3/s] \\
 Q_{Restwasser} &: \text{Ausfluss aus dem Stausee (Dotation) } [m^3/s] \\
 Q_{Zu,BF} &: \text{Zuflussmenge der seitlichen Zuflüsse zwischen Blatten und}
 \end{aligned}$$

Ferden [m^3/s]
 x_{Anteil} : Verhältnis: Zuflussmenge Ferden-Gampel zur Zufluss-
menge Blatten-Ferden [-]

Zwischen Gampel und der Rhône gibt es keine lateralen Zuflüsse.

Da die ganze Strecke von Gampel bis zur Mündung in die Rhône kanalisiert ist, können die Flussbetteigenschaften gut bestimmt werden. Die Breite des Bachbetts beträgt hier 10 m, Die Wände des Kanals sind sehr steil: der Böschungswinkel ist nur etwa 5°.

Zur Abschätzung des Reibungswiderstandes konnte auch in diesem Abschnitt auf Grund der grossen Strömung keine Korngrössenanalyse durchgeführt werden. Auch für den Tracerversuch war der Abfluss zu gross, so dass der Reibungskoeffizient f (0.164) und der Dispersionsfaktor ϕ (0.03) nur grob bestimmt werden konnten. Totzonen wurden keine eingeführt. Die verwendeten hydraulischen Daten sind in der Tabelle 8.3 zu finden.

Parameter	Variable	Grössen	Standard- abweichung	Quelle
Länge	x	1482 m	10 m	Landeskarte
Gefälle	S_0	1.3%	0.3%	Landeskarte
Wasserinput KW	Q_{KW}	0-22 m^3/s	0.5 m^3/s	KW Lötschen
Wasserinput RW	Q_{BK} x_{Anteil}	0-7 m^3/s 0.166	0.5 m^3/s 0.1	BWG/KW P.schätzung
laterale Zuflüsse	q_{lat}	0	0	
Bachbettbreite	w_{bed}	10 m	1 m	Messung
Böschungswinkel	α	5°	5°	Abschätzung
Reibungskoeffizient	f	0.164	0.3	Tracerversuch
Dispersionsfaktor	ϕ	0.03	0.1	Tracerversuch

Tabelle 8.3: Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Gampel-Rhône.

8.3.2 Wärmehaushaltmodell

Die benötigten Randbedingungen für die Temperaturmodellierung dieses Flussabschnitts wurden wie folgt zusammengetragen:

Die meteorologischen Bedingungen, relative Feuchtigkeit und Globalstrahlung, werden von der Wetterstation in Visp übernommen. Bei der Temperatur und dem Druck wird noch die Höhenabhängigkeit betrachtet (Bei der Temperatur mit dem Gradient der Messwerte der Stationen Blatten und Visp, beim Druck mit der barometrischen Höhenformel mit den Messwerten von Visp). Die Bewölkung wird in Visp nicht gemessen, weshalb die Messungen von Sion verwendet werden. In Sion wird die Bewölkung 7 Mal am Tag bestimmt (1, 4, 7, 10, 13, 19 und 20 Uhr).

Mit den gemessenen Temperaturdaten werden wiederum die Parameter Wärmeaustauschkoeffizient K , Beschattung k_B , Anteil der ins Sediment gelangten kurzwelligeren Strahlung f_s , Sedimenteigenschaften k_{sed} und Windfaktor f_A abgeschätzt.

Die Initialtemperatur des Sediments ist in diesem Abschnitt nicht wichtig, da die Wärmekapazität des Sediments sehr klein ist (das gemauerte Bachbett kann die Wärme kaum speichern). Die Sedimenttemperatur passt sich deshalb sehr schnell der Temperatur des Flusses an.

Die geschätzten Parameter (Tabelle 8.4) bewegen sich in einem plausiblen Bereich. Einziger Ausreißer fällt etwas tief aus, da durch die Kanalmauer ein grösserer Beschattungseffekt erwartet wird.

Parameter	Vari- able	Grössen	Standard- abweichung	Quelle
Beschattung	k_B	0	0.2	P.schätzung
geographische Breite	LA	46.4°	0.1°	Karte
geographische Länge	LO	7.8°	0.1°	Karte
Sediment- eigenschaften	k_{sed}	$6.5 \cdot 10^5 \text{ J/K/m}^2$	$3.25 \cdot 10^5 \text{ J/K/m}^2$	P.schätzung
Wärmeaustausch- koeffizient	K	$140 \text{ W/m}^2/\text{K}$	$30 \text{ W/m}^2/\text{K}$	P.schätzung
Anteil kurzweiliger Strahlung ins Sediment	f_s	0	0.1	P.schätzung
Windfaktor	f_A	0	0.5	P.schätzung
Initialtemperatur des Sediments	$T_{S_{ini}}$	Start: 9°C Ende: 9°C	3°C 3°C	Anpassung Anpassung

Tabelle 8.4: Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Gampel und der Mündung in die Rhône im Sommer 02.

8.3.3 Resultate

Die simulierten und die gemessenen Temperaturwerte der Lonza 5 m vor der Mündung in die Rhône sind in der Abbildung 8.4 dargestellt.

Die Temperatursprünge als Folge des Kraftwerksbetriebs können mit dem Modell sehr gut nachgebildet werden. Die kleinen zeitlichen Verschiebungen sind eine Folge der Differenz der zeitlichen Auflösung der Eingabedaten. Die Abflussdaten des Kraftwerks und die meisten Wetterdaten stehen nur in stündlichen Abständen zur Verfügung. Dies kann zu einer Verzögerung gegenüber der im 20 Minutenabständen gemessenen Temperatur führen.

Abweichungen treten bei der Modellierung von Situationen mit geringem Abfluss während des Tages auf. Die simulierte Wassertemperatur, errechnet während zweier Perioden (am 8. und 15. September jeweils Sonntags) zwar auch eine klare Temperaturspitze, die gemessenen Temperaturen sind aber noch um etwa 2°C höher. Eine Hypothese zur Erklärung dieser Differenz besteht darin, dass bei stark reduziertem Abfluss der Wärmeaustausch durch die verwendeten Werte nicht mehr optimal parametrisiert wird. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass der Temperaturlogger bei der Mündung in die Rhône, wegen des geringen Abflusses, nicht mehr vollständig im Wasser war und deshalb etwas zu hohe Temperaturen anzeigte. Die Auswirkungen dieser Abweichung auf den integrierten Wärmeeintrag in die Rhône sind nicht gravierend, da die Lonza während diesen Phasen nur sehr wenig Wasser führt.

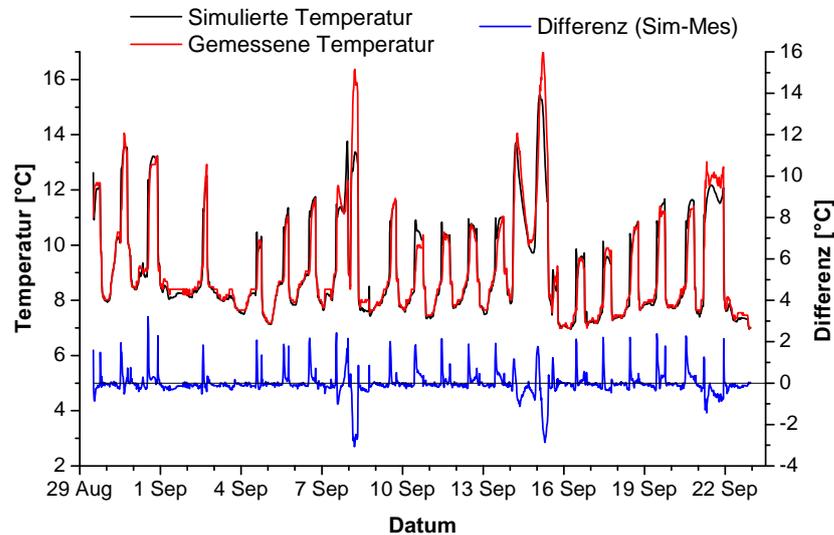


Abbildung 8.4: Die simulierte und die gemessene Wassertemperatur in der Lonza bei der Mündung in die Rhône im Sommer 02.

Die berechneten Energieflüsse sind in der Abbildung 8.5 dargestellt. Der grösste Energieinput in diesem Abschnitt ist die langwellige Abstrahlung mit durchschnittlich 330 W/m^2 , kompensiert wird dieser Energieinput durch die langwellige Ausstrahlung (Mittelwert 350 W/m^2). Während des Tages stellt die Solareinstrahlung den wichtigsten Energieinput dar (bis zu 780 W/m^2). Die Dissipation spielt auf Grund des geringen Gefälles in diesem Abschnitt keine Rolle (Mittelwert 85 W/m^2). Für die Dämpfung der Temperaturschwankungen ist der Energieaustausch mit dem Sediment verantwortlich. Die Energieflüsse ins Sediment bzw. aus dem Sediment liegen bei grossen Temperaturdifferenzen im Bereich von bis zu 550 W/m^2 , über die ganze Periode ist der Energieaustausch mit dem Sediment genau ausgeglichen.

Insgesamt nimmt der Fluss in diesem Abschnitt 240 W/m^2 auf. Bei einer berechneten Flussoberfläche von ca. $15'000 \text{ m}^2$ und einem durchschnittlichen Abfluss von etwa $10 \text{ m}^3/\text{s}$, entspricht dies einer Erwärmung um $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Abschnitt ist ausser bei unnatürlich kleinem Abfluss für die Erwärmung der Lonza nicht entscheidend.

8.4 Ferden-Gampel

Die Restwasserstrecke von Ferden bis Gampel kann man in zwei Abschnitte unterteilen der obere ist flacher und weniger stark beschattet als der untere. Die Unterteilung wird bei der Temperaturmessung in Greber vorgenommen. Für die beiden Abschnitte wird jeweils eine separate Modellanpassung durchgeführt. Neben der Beschattung können sich unterhalb Greber auch die Sedimenteigenschaften ändern. Da sich die Verhältnisse der Sedimentzusammensetzung im

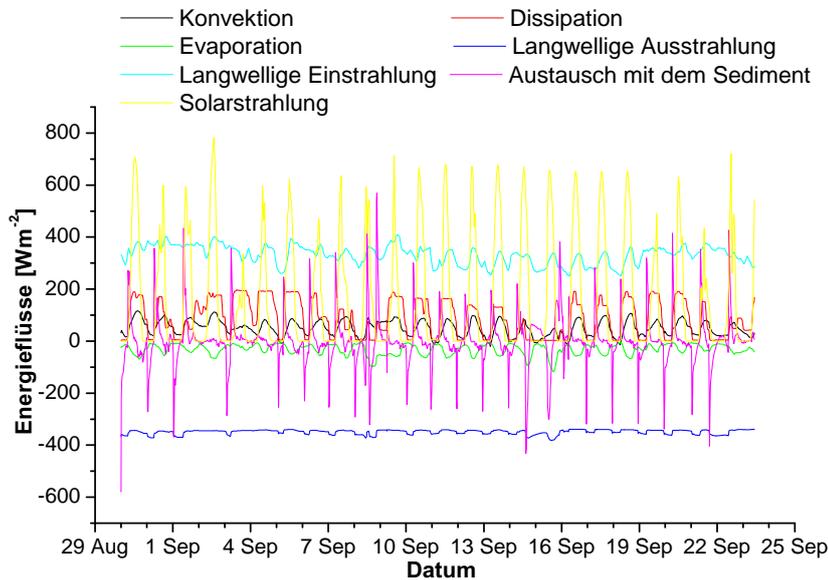


Abbildung 8.5: Die im Modell berechneten Energieflüsse der Lonza im Flussabschnitt von Gampel bis zur Mündung in die Rhône im Sommer 02 (aufgezeichnet bei der Mündung).

Feld nicht offensichtlich unterscheiden, wird erwartet, dass sich die Werte in der gleichen Größenordnung bewegen.

Die Simulation des ersten Abschnittes wird bei der Temperaturmessung in Riti gestartet und geht bis zum Logger in Greber. Der zweite Abschnitt umfasst die Strecke Greber bis Gampel-Steg, kurz vor der Einleitung des turbinieren Wassers aus dem Kraftwerk.

8.4.1 Hydraulik

In Bezug auf die Flussgeometrie wird der erste Abschnitt von Riti nach Greber noch einmal in 2 Unterstrecken unterteilt. Die erste Unterstrecke von Riti nach Goppenstein ist flacher und weniger breit, im zweiten Teil (von Goppenstein nach Greber) entsprechen die Bedingung in etwa denen der Strecke Greber-Gampel. (Länge, Gefälle und Lage der Strecken werden mit Hilfe von Karten ermittelt.)

Der Abfluss vom Stausee in die Restwasserstrecke ist bekannt. Die Restwassermengen und der allfällige Überlauf werden vom KW Lötschen festgehalten. Keine Angaben sind zu den seitlichen Zuflüssen auf der Strecke vorhanden. Die Gesamtmenge aller Zuflüsse wurde in der Simulation des Abschnittes Gampel-Rhône bestimmt (vergleiche Formel 8.1). Der mit Hilfe der Temperaturmessungen in Gampel abgeschätzte Faktor x_{Anteil} wird auch in diesem Abschnitt verwendet. Bezüglich der Verteilung der Zuflüsse wird angenommen, dass diese gleichmässig über den Streckenverlauf einmünden. Die Einleitung des Baustel-

lenwassers wird als separater punkteller Zufluss bei Goppenstein in das Modell eingeführt.

Die Reibungseigenschaften der Abschnitte wurden mit der Formel 4.13 aus dem Kapitel 4 beschrieben. Um die Formel anwenden zu können, wurden Korngrößenanalysen durchgeführt und die D_{84} -Werte bestimmt (D_{84} bedeutet, dass 84% der gemessenen Steine der Stichprobe kleiner sind als der angegebene Wert).

Die gesamte Strecke hat auf Grund ihres Gefälles einen typische Pool- und Riffles-Charakter (deutsch: Furten und Kolken) mit grossen Aufenthaltszeit in den Pools. Um die Effekte dieser Pools zu berücksichtigen, werden im Modell Totzonen eingefügt. Zur Bestimmung der Parameter der Totzone wurden auf der Strecke Tracerversuche durchgeführt, welche mit dem hydraulischen Modell nachgebildet wurden. Ein Tracerversuch fand in Gampel statt. Der Versuchsort befindet sich zwar im zweiten Abschnitt, ist auf Grund des Gefälles und der Geometrie aber repräsentativ für den oberen Streckenabschnitt. Ein andere Versuch wurde in Greber durchgeführt, dieser Versuch repräsentiert die steileren Abschnitte der Lonza.

Bei der Modellierung der Tracerversuche werden die Geometrie, die Abflussdaten und der Tracereintrag in das Programm eingegeben, um den Verlauf der Tracerkonzentration vom Programm berechnen zu lassen. Mittels Anpassung der simulierten an die gemessene Tracerkurve werden die Parameter (β und q_{ex}^{pool}) der Totzone abgeschätzt. β entspricht dem Anteil der Querschnittsflächen der Poolzone an der gesamten Querschnittsfläche des Flusses, q_{ex}^{pool} ist der Wasseraustausch zwischen der advektiven Zone und der Poolzone. In den Abbildungen 8.6 und 8.7 sind die gemessenen und die simulierten Tracerkurven dargestellt.

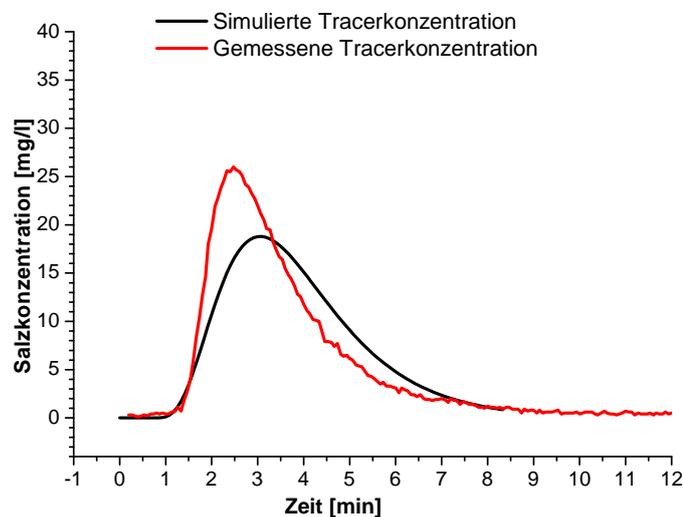


Abbildung 8.6: Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Gampel.

Die verwendeten Eingaben, die berechneten und die abgeschätzten Werte der Tracerversuche sind in der Tabelle 8.5 zusammengefasst.

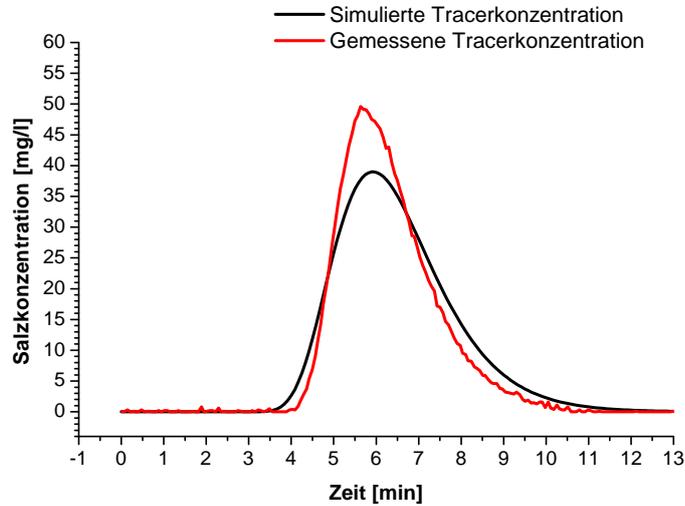


Abbildung 8.7: Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Greber.

Parameter	Variable	Gampel	Greber	Quelle
Abfluss [m^3/s]	Q	0.4	0.4	Tracerversuch
Länge [m]	x	73	129	Messung
Gefälle [-]	S_0	4%	7%	Karte
Böschungswinkel [$Grad$]	α	60°	50°	Abschätzung
Korngrösse [cm]	D_{84}	0.48	0.4	Messung
Reibungskoeffizient [-]	f	1	0.9	Modell
Bachbettbreite [m]	w_{bed}	5	4.5	Modell
mittlere Transportgeschwindigkeit [m/s]	v_{mean}	0.36	0.5	Modell
Querschnittsfläche [m^2]	A_{tot}	1.11	0.77	Modell
Querschnitt advektive Zone [m^2]	A_{adv}	0.65	0.5	Modell
Querschnitt Totzone [m^2]	A_{pool}	0.46	0.27	Modell
Anteil Totzone [-]	β	0.42	0.35	Modell
Wasseraustausch advektive Zone-Totzone [m^2/s]	q_{ex}^{pool}	0.06	0.06	Modell

Tabelle 8.5: Verwendete und berechnete Parameter bei den Tracerversuchen auf der Strecke zwischen Ferden und Gampel.

Die Tracerkurven können mit den verwendeten Werten befriedigend nachgebildet werden. Eine noch bessere Abbildung wäre mit einer Messung auf einer längeren Untersuchungsstrecke möglich. Da aber die abgeschätzten Werte für q_{ex}^{pool} und β einer plausiblen Grössenordnung entsprechen, werden sie für die

Modellierung verwendet. In der Tabelle 8.6 sind die verwendeten hydraulischen Daten den entsprechenden Flussabschnitten zugeordnet.

Bei einer weiteren Untersuchung müssten die Tracerversuche noch einmal über eine längere Distanz durchgeführt und die Parameter neu geschätzt werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn man sich auch für die Simulation von Stofftransportprozessen anstelle der Temperatur interessiert.

Parameter	Variable	Größen/ Auflösung	Standard- abweichung	Quelle
Distanz	x	1630 <i>m</i>	50 <i>m</i>	Karten
Riti-Goppenstein		1057 <i>m</i>	50 <i>m</i>	
Greber-Gampel		4126 <i>m</i>	50 <i>m</i>	
Gefälle	S_0	3.6%	0.3%	Karten
Riti-Goppenstein		10.4%	0.5%	
Greber-Gampel		10.2%	0.1%	
Wasserinput	Q_{Rw}	0.1 m^3/s	0.01 m^3/s	KW
Restwasser				
Überlauf	Q_{Ue}	0	0 m^3/s	
laterale Zuflüsse	x_{Anteil}	0.166	0.1	P.schätzung
Bachbettbreite	w_{bed}	4.5 <i>m</i>	1 <i>m</i>	Abschätzung
Riti-Goppenstein		3 <i>m</i>	1 <i>m</i>	
Greber-Gampel		3 <i>m</i>	1 <i>m</i>	
Böschungswinkel	α	70°	20°	Abschätzung
Riti-Goppenstein		50°	20°	
Greber-Gampel		50°	20°	
Korngrößenverteilung	D_{84}	0.48 <i>m</i>	0.2	Feldmessung
Riti-Goppenstein		0.4 <i>m</i>	0.2	
Greber-Gampel		0.4 <i>m</i>	0.2	
Totzonenanteil	β	0.42	0.2	P.schätzung
Riti-Goppenstein		0.35	0.2	
Greber-Gampel		0.35	0.2	
Wasseraustausch	q_{ex}^{pool}	0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	P.schätzung
Riti-Goppenstein		0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	
Greber-Gampel		0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	

Tabelle 8.6: Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Ferden-Gampel.

8.4.2 Wärmehaushaltmodell

Die meteorologischen Bedingungen werden von den Messstationen übernommen. Bezüglich der Bewölkung stehen Daten von Blatten und Sion zur Verfügung. Da

sich die ganze Strecke im Tal befindet, werden die Werte von Blatten verwendet, obwohl die Daten in Sion zeitlich besser aufgelöst sind.

Die unbekannt Parameter Wärmeaustauschkoeffizient K , Beschattung k_B , Windfaktor f_A , Anteil der ins Sediment gelangten kurzwelligeren Strahlung f_s und Sedimenteigenschaften k_{sed} werden mit den gemessenen Temperaturen für die Strecken Riti-Greber und Greber-Gampel separat abgeschätzt. Die Initialtemperatur des Sediments $T_{sed,ini}$ wird so ins Gleichgewicht gesetzt, dass bei Greber kein Temperatursprung entsteht. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 8.7 zu finden.

Parameter	Variable	Größen/ Auflösung	Standard- abweichung	Quelle
Beschattung Riti-Greber Greber-Gampel	k_B	0.55 0.78	0.1 0.1	P.schätzung
Sedimenteigenschaften Riti-Greber Greber-Gampel	k_{sed}	$2 \cdot 10^6 \text{ J//K/m}^2$ $5 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	$2 \cdot 10^6 \text{ J//K/m}^2$ $3 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	P.schätzung
Wärmeaustausch- koeffizient Riti-Greber Greber-Gampel	K	120 $\text{W/m}^2/\text{K}$ 120 $\text{W/m}^2/\text{K}$	40 $\text{W/m}^2/\text{K}$ 40 $\text{W/m}^2/\text{K}$	P.schätzung
Anteil kurzweiliger Strahlung ins Sediment Riti-Greber Greber-Gampel	f_s	0.2 0.15	0.1 0.1	P.schätzung
Windfaktor Riti-Greber Greber-Gampel	f_A	0.8 0.5	0.5 0.5	P.schätzung
Initialtemperatur des Sediments	$T_{S_{ini}}$	Riti: 10.2°C Greber: 11.4°C Gampel: 12.4°C	0.5°C 0.5°C 0.5°C	Anpassung Anpassung Anpassung
geographische Breite Riti-Gampel	LA	46.4°	0.1°	Karte
geographische Länge Riti-Gampel	LO	7.8°	0.1°	Karte

Tabelle 8.7: Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Riti und Gampel im Sommer 02.

Die abgeschätzten Werte sind im plausiblen Rahmen und bewegen sich für beide Abschnitte in der gleichen Grössenordnung. Insbesondere die Sedimenteigenschaften sind in beiden Abschnitten in einem sehr ähnlichen Rahmen. Einzig die Beschattung fällt im zweiten Abschnitt deutlich höher aus, dies entspricht aber auch den, bei der Begehung festgestellten natürlichen Begebenheiten.

8.4.3 Resultate

Die simulierten Temperaturwerte der Strecken Riti-Greber und Greber-Gampel sind in den Abbildungen 8.8 und 8.9 aufgezeichnet.

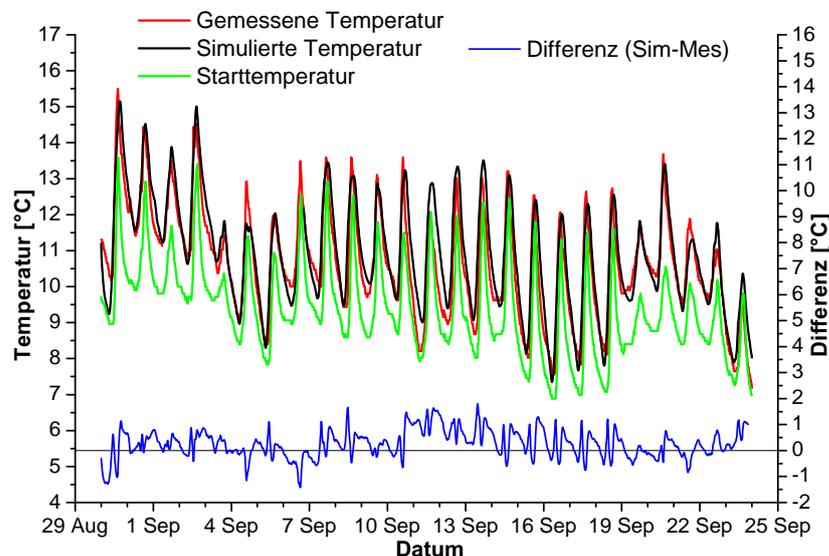


Abbildung 8.8: Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Greber, Starttemperatur in Riti, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.

Die Nachbildung der Temperaturregimes dieser schwierigen Strecken gelingt sehr gut. Alle wichtigen Temperaturänderungen der gemessenen Daten werden auch durch die simulierten Werte nachgebildet. Gewisse Abweichungen lassen sich jedoch nicht vermeiden (zu frühe Erwärmung in den Morgenstunden, bedingt durch die Verwendung der Solareinstrahlungsdaten von Montana).

Die Energieflüsse sehen in beiden Abschnitten in etwa gleich aus. Die Solarstrahlung ist wegen der grösseren Beschattung im zweiten Teil etwas kleiner. Die Dissipation ist stark abhängig vom Gefälle an der jeweiligen Stelle. Als Beispiel sind in der Abbildung 8.10 die Energieflüsse für Goppenstein dargestellt, einer Stelle mit geringerem Gefälle.

8.5 Unsicherheitsanalyse

Um die Unsicherheit der Simulationen zu überprüfen, wird für die Modellvariable T_W eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Der Standardfehler für die Wassertemperatur wird für die 4 simulierten Strecken einzeln am Ende der Untersuchungsstrecke bestimmt. Der Standardfehler wird über die ganze Untersuchungsperiode gemittelt (Mittelwert der absoluten Werte). Die Sensitivitätsfunktion wird mit dem Computerprogramm Aquasim berechnet.

Die untersuchten Parameter mit den verwendeten Standardabweichungen, sowie die Resultate für die einzelnen Parameter sind im Anhang B in den Tabellen B.1 bis B.4 für die einzelnen Streckenabschnitte zusammengetragen. Die kumulierten Standardfehler der Wassertemperaturen bei den Messpunkten mit

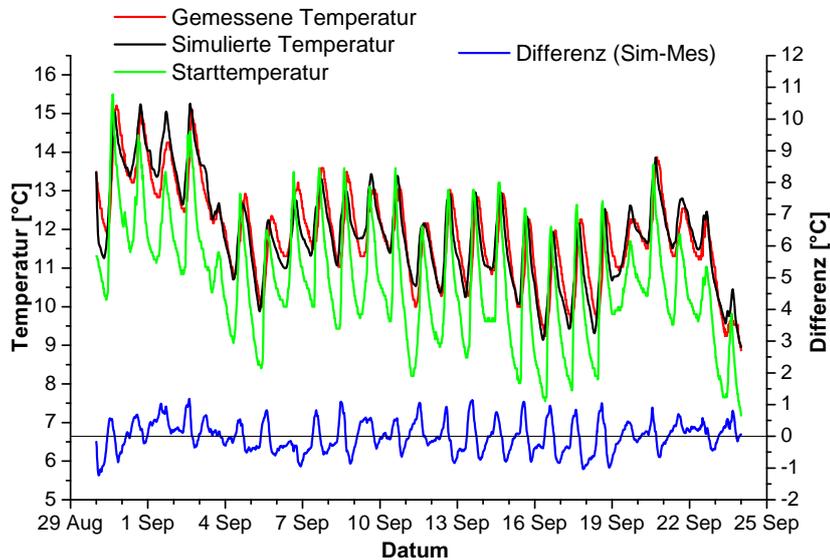


Abbildung 8.9: Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Gampel, Starttemperatur in Greber, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.

den hauptsächlich dafür verantwortlichen Parameter sind in der Tabelle 8.8 zusammengefasst.

	Kippel	Greber	Gampel	Rhône
Summe [$^{\circ}C$]	0.43	1.22	1.14	0.29
Parameter 1	T_{lat}	k_{sed}	T_{lat}	T_{KW}
Parameter 2	$T_{Blatten}$	T_{lat}	k_B	x_{Anteil}
Parameter 3	H_S^g	k_B	k_{sed}	Q_{KW}

Tabelle 8.8: Die Summen und die betragsmässig wichtigsten Parameter der Unsicherheitsanalyse der einzelnen Untersuchungsstrecken. Die Werte sind über die Zeit gemittelte und für die modellierten Temperaturwerte am Ende der Untersuchungsstrecken bestimmt.

Die Unsicherheiten sind verglichen mit den prognostizierten Temperaturänderungen relativ gross und können die Abweichungen der Simulation von den gemessenen Werten erklären.

Als für die Unsicherheit wichtige Parameter wurden auf der Strecke Blatten-Kippel die Temperaturen der lateralen Zuflüsse, die Temperatur am Anfang der Strecke in Blatten und die Solarstrahlung identifiziert. In den Restwasserstrecken kommt als Parameter mit grossem Einfluss die Sedimentkapazität und Beschattung dazu. In der letzten kurzen Strecke von Gampel zur Mündung der Rhône sind praktisch nur die Werte der Randbedingungen (Einflusstemperatur des Kraftwerks, Einflussmenge der Restwasserstrecke und Einfluss des Kraft-

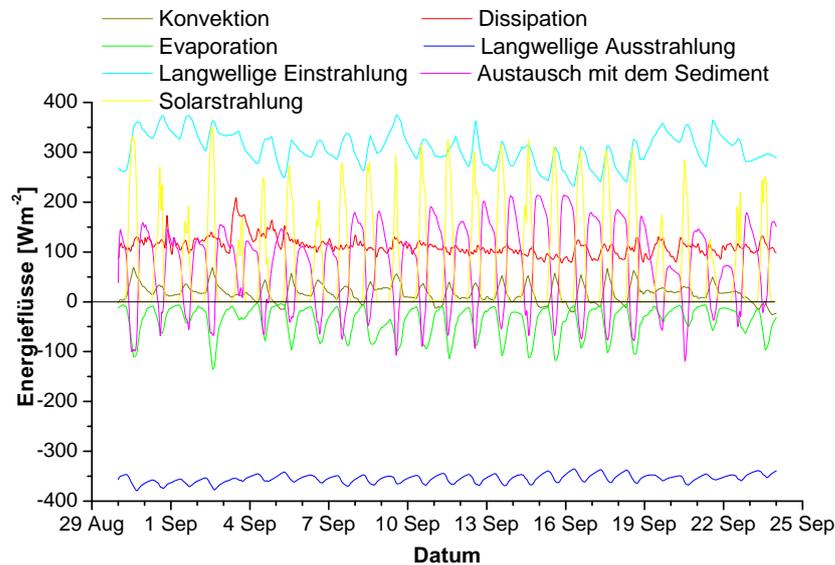


Abbildung 8.10: Die im Modell berechneten Energieflüsse in der Restwasserstrecke berechnet in Goppenstein im Sommer 02.

werks) von Bedeutung.

Als sehr wichtiger Parameter wurde auf allen Strecken (ausser Gampel-Rhône ohne Zuflüsse) die Temperatur der Zuflüsse identifiziert. Bei einer weiteren Analyse muss der Messung der Zuflussbedingungen ein höheres Gewicht beigemessen werden. Bei der Modellierung der Restwasserstrecken mit höherem Abfluss sind die Einflüsse weniger problematisch, da sie bei hohem Abfluss weniger ins Gewicht fallen.

Die Schwierigkeit bei der Unsicherheitsanalyse besteht darin, für die Standardabweichung der Modellparameter vernünftige Werte abzuschätzen. Soweit wie möglich wurden dabei die von Meier verwendeten Werte zum Vergleich herangezogen. Bei den vor Ort werden Werte muss wegen der weniger umfangreichen Felddaten von etwas grösseren Unsicherheiten als bei Meier ausgegangen werden; dadurch werden auch die Summen der Unsicherheitswerte etwas gross.

8.6 Validierung der Restwasserstrecke

Das Temperaturregime auf der Strecke Ferden-Gampel konnte für den Restwasserabfluss sehr gut modelliert werden. Wenn man nun die Flusstemperaturen bei natürlichen Verhältnissen nachbilden will, stellt sich die Frage, wie genau die Modellierungen für den Wärmehaushalt bei deutlich grösserem Abfluss (Faktor 100) stimmt.

Um das Modell bei grösserem Abfluss zu testen, eignet sich die Überlaufphase im Juli (vergleiche Abschnitt 7.1.2). Während dieser Phase war der Zufluss in

den Stausee so gross, dass trotz maximaler Energieproduktion nicht die gesamte Wassermenge turbiniert werden konnte, so dass ein Teil des Wasser (zusätzlich zur Restwassermenge) über den Überlauf in die Restwasserstrecke floss. Dadurch wurde der Abfluss in der Restwasserstrecke erheblich erhöht (bei der Überlaufspitze betrug der Abfluss $30 \text{ m}^3/\text{s}$, bei der normalen Restwassermenge beträgt er $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$). In dieser Periode waren jedoch erst die Temperaturlogger in Kippel und Greber installiert. Um diese Strecke modellieren zu können, muss man auch den Durchfluss durch den Stausee berücksichtigen. Die Modellierung wird für das Zeitfenster vom 15. bis zum 29. Juni durchgeführt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Die Strecke von Kippel bis zum Beginn des Stausees (Streckenlänge 2 km , 40 m Höhendifferenz) wird mit den gleichen Eigenschaften wie der Flussabschnitt Blatten-Kippel modelliert. Als Inputdaten werden die gemessenen Temperaturen in Kippel und die Abflussdaten des BWG in Blatten plus die seitlichen Zuflüsse von Blatten bis Kippel eingegeben.

Um den Effekt des Stausees zu simulieren, wird der See als vollständig durchmischt mit einem konstanten Wasservolumen von $1.89 \text{ Mio } \text{m}^3$ modelliert. Über die Seeoberfläche (106000 m^2) werden die Energieaustauschprozesse Konvektion, Evaporation, langwellige Ausstrahlung, langwellige Einstrahlung und die Solarstrahlung berücksichtigt. Der Wärmeaustausch mit dem Sediment wurde vernachlässigt, da bei grosser Wassertiefe der Austausch mit dem Sediment keine Rolle spielt und die grosse Wärmekapazität des Sees selbst für eine ausgeglichene Temperatur sorgt. Zusätzlich wird der konstante Wärmeinput (3 MW) durch die Tunnelkühlung (Abschnitt 7.1.1) ins Modell einbezogen.

Für die kurze Distanz von der Staumauer bis nach Riti (Länge 1 km , Höhendifferenz 25 m) werden die Eingaben der Strecke Riti-Goppenstein verwendet. Die berechnete Temperaturkurve ist in der Abbildung 8.11 abgebildet.

Die Temperaturänderungen beim hohen Restwasserabfluss werden mit der Simulation gut nachgebildet. Übereinstimmend mit den gemessenen Temperaturdaten ist auch bei den simulierten Werten eine Reduktion der Wassertemperatur bei steigendem Abfluss (ab dem 19.) feststellbar. Die simulierten Temperaturwerte in der Überlaufphasen fallen aber zu tief aus. Die Differenzen treten in der Überlaufphase vor allem in der Nacht auf (bis zu 2°C), wenn der Abfluss nur unwesentlich über dem Restwasserabfluss liegt.

Die Gründe für die zu tiefe Temperatur sind im Stausee zu suchen. Beim Modell wird angenommen, dass der Stausee vollständig durchmischt sei, eine Annahme, welche die Wirklichkeit nur ungenügend beschreibt. Obwohl der Stausee nur eine kurze Aufenthaltszeit hat, ist die Temperatur nicht überall gleich. Vor allem die Tunnelkühlung kann einen Einfluss auf die Temperaturschichtung haben. Die Einleitung der Kühlung befindet sich in der Nähe der Staumauer, das Wasser hat eine höhere Temperatur als die Umgebung, deshalb wird sich dieses Wasser, auf Grund seiner geringeren Dichte, an der Oberfläche einschichten. Das Wasser des Überlaufs stammt nun genau aus dieser obersten Schicht.

Vor allem in der Nacht wenn die Überflussmenge klein ist, kann diese stark von dem warmen Kühlwasser beeinflusst sein und sich auf die Restwassermenge auswirken. Am Tag wenn die Überlaufmengen gross sind, fällt die Erwärmung durch die Tunnelkühlung nicht mehr so stark ins Gewicht. Was die Differenzen zwischen der simulierten und gemessenen Werten bis zu einem gewissen Grad erklären kann.

Eine weitere Fehlerquelle sind die verfügbaren Daten über die kurze Rest-

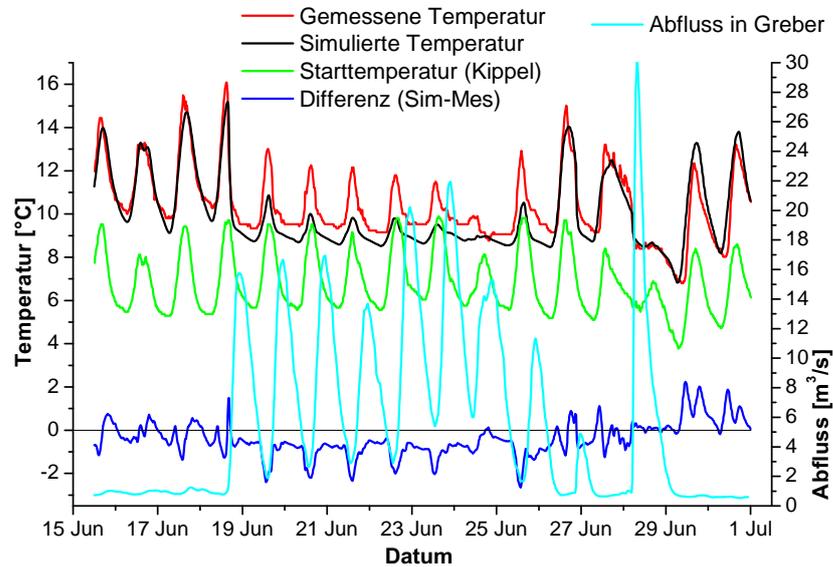


Abbildung 8.11: Die simulierte und die gemessene Wassertemperatur, sowie der Abfluss während der Überlaufphase in der Lonza bei Riti im Sommer 02.

wasserstrecke von der Staumauer bis nach Riti. In diesem kurzen Bereich bilden sich bei niedrigem Abfluss wegen dem niedrigen Gefälle kleine Stauungen (Poolzonen) mit längeren Aufenthaltszeiten. Diese Zonen werden vom Modell nur ungenügend berücksichtigt, da sie im geeichten Bereich nicht vorkommen. Inwiefern diese während der Überlauf Situation von Bedeutung sind, konnte nicht geklärt werden.

Um den Stausee in die Modellierung einbeziehen zu können, sind noch Messungen des Temperaturprofils und die entsprechende Zuordnung des Restwasserabflusses und der Wasserfassung für die Energiegewinnung vorzunehmen.

Eine Ungenauigkeit, die bei der Analyse der Resultate erkannt wurde, betrifft die mittlere Transportgeschwindigkeit: Mit der verwendeten Formel wird der Reibungskoeffizient f bei grossem Abfluss zu klein und die simulierten Geschwindigkeiten übersteigen den plausiblen Wertebereich (über 3 m/s). Das wird korrigiert, indem der Reibungskoeffizient f für diesen Abschnitt, wie auch schon in den anderen Abschnitten geschehen, konstant gesetzt wird. Bis Goppenstein verwendet man den Wert 1.2, danach den Wert 1. Dadurch bleiben die Geschwindigkeitsvariationen im erwarteten Rahmen. Auf die absoluten Temperaturwerte hat diese Änderung aber praktisch keine Auswirkung.

Kapitel 9

Modellvoraussagen

Um die Auswirkungen der Wassernutzung auf die Wassertemperatur und den Wärmehaushalt zu analysieren, wird mit dem Modell der ursprüngliche Zustand der Lonza für die Zeit vor dem Kraftwerksbau modelliert und mit der aktuellen Situation verglichen.

Die Modellierung des ursprünglichen Zustandes wird bei der Temperaturmessung in Kippel gestartet, da dort keine für das Temperaturregime wesentlichen Eingriffe stattfinden. Bei natürlichem Abfluss muss beim Übergang von Kippel nach Gampel der Stausee nicht mehr modelliert werden, da dieser im natürlichen Flusslauf entfällt. Dadurch entfällt auch die Unsicherheit der Parametrisierung des Stausees. Bis zur Staumauer (3 km, 80 m Höhendifferenz) wird der natürliche Fluss mit den Charakteristiken der Strecke Blatten-Kippel beschrieben. Ab der Staumauer wird die Strecke Riti-Goppenstein als Referenz verwendet. Ab Riti werden die im Kapitel 8 geeichten Flussabschnitte fortlaufend aneinander gereiht. Der Abfluss und die Temperatur werden dabei von Abschnitt zu Abschnitt weitergegeben.

Bei den Simulationen hat man gesehen, dass durch die unterschiedliche Auflösung der Eingabedaten zeitliche Verschiebungen zwischen den gemessenen und den simulierten Daten entstehen. Um diese Effekte auszuschalten, werden die modellierten Temperaturwerte der unbeeinflussten Strecke nicht mit den gemessenen Temperaturen des aktuellen Zustandes verglichen, sondern das jetzige Temperaturregime wird ebenfalls modelliert und zum Vergleich beigezogen. Wenn man die Differenz der beiden simulierten Kurven betrachtet, werden durch diese Vorgehen systematische Fehler ausgeglichen. Wegen der Schwierigkeit bei der Modellierung des Stausees wird der aktuelle Zustand erst ab Riti simuliert (gleiche Inputdaten wie bei den geeichten Modellen).

Da man den aktuellen und den ursprünglichen Zustand simuliert, hat man die Möglichkeit gewisse Prozesse auszuschalten. So wird der Zufluss des Baustellenwassers in beiden Simulationen (ursprünglich und aktuelle) weggelassen, da dieser Zufluss nur zeitlich begrenzt während der Neat-Bauzeit aktiv ist. Dieser warme Zufluss führt zu einer Verzerrung der Temperaturdifferenz, da er bei einem kleinen Abfluss einen grösseren Einfluss hat. Die Tunnelkühlung dagegen kann nicht ausgeschaltet werden, da die momentane Situation erst ab Riti simuliert wird.

Auf Grund der Kenntnisse der Verhältnisse während der Überlaufphase wird der Reibungskoeffizient f in den Simulationen im Abschnitt Ferden-Gampel mit

einem konstanten Wert nachgebildet (1.2 bis Goppenstein, 1 für den Rest der Strecke).

Um die aktuelle mit der ursprünglichen Situation vergleichen zu können, werden bei beiden als Randbedingungen die meteorologischen Daten des Sommers 02 (30. August bis 23. September) verwendet.

Bei der Analyse der Resultate muss man beachten, dass die Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Szenarien auf folgenden zwei Unterschieden gründen: Erstens auf dem Effekt der nur kleinen Restwassermenge, zweitens auf dem temperatenausgleichenden Effekt des kleinen Stausees, welche beide bei der Modellierung des ursprünglichen Zustandes entfallen.

9.1 Temperaturen auf der Restwasserstrecke

Die Temperaturkurven des aktuellen Restwasserabflusses und des ursprünglichen Abflusses muss man vor dem Hintergrund vergleichen, dass es sich beim Restwasserabfluss um eine simulierte durchschnittliche Wassermenge von $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Schwankungen 0.2 bis $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$) handelt, während der hypothetische, unbeeinflusste Abfluss $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Schwankungen 5.4 bis $22.3 \text{ m}^3/\text{s}$) beträgt. Der unbeeinflusste Abfluss weist zudem einen ausgeprägten Tagesgang auf: im Mittel beträgt die Differenz zwischen den Extremwerten $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Die grössten Abflussmengen werden am Nachmittag, die kleinsten am Morgen simuliert. Beim Restwasserabfluss wird der Tagesgang durch die konstante dotierte Menge beim Stausee ausgeglichen. Die prognostizierten Abflussmengen in Gampel vor der Wasserrückleitung des Kraftwerks mit und ohne hydraulischer Nutzung sind in der Abbildung 9.1 dargestellt. Die Grundlagen dieser Simulation bilden die Abflussmessungen in Blatten und beim Stausee.

In der Abbildung 9.2 sind die simulierten Temperaturwerte für den aktuellen Restwasserabfluss und den ursprünglichen Abfluss in Gampel vor der Wasserrückleitung des Kraftwerks in Gampel-Steg dargestellt.

Die simulierten Temperaturen sind im unbeeinflussten Abfluss im Durchschnitt um 3.1°C tiefer als bei der simulierten momentanen Situation. Die Differenz bleibt über den ganzen Tagesverlauf relativ konstant. Die Differenz der Minima und der Maxima betragen im Schnitt auch etwa 3°C .

Gegenüber der Ausgangstemperatur in Kippel hat sich der unbeeinflusste Abfluss im Durchschnitt um 2.1°C , das Restwasser um 5.2°C erwärmt. Auf Grund der Höhendifferenz von 695 m zwischen der Messung in Blatten (1345 müM) und Gampel (650 müM) können 1.6°C dieser Temperaturerhöhung auf die Umwandlung von potentieller Energie in Wärme zurückgeführt werden. Dieser Effekt ist unabhängig von der Abflussmenge und führt bei jedem Wasservolumen zur gleichen Temperaturerhöhung, da der Energieinput dieses Vorganges direkt proportional zur Abflussmenge ist.

Die restliche Erwärmung 0.5°C beim unbeeinflussten und 3.6°C bei reduziertem Abfluss sind Folgen der übrigen Wärmeaustauschprozesse (Solarstrahlung, langwellige Einstrahlung, langwellige Ausstrahlung, Verdunstung, Konvektion und der Wärmeaustausch mit dem Sediment). Diese Prozesse sind proportional zur Grösse der Wasseroberfläche, respektive der Sediment-Wassergrenzfläche. Da die Wasseroberfläche bei der Zunahme des Abflusses proportional weniger zunimmt als das Volumen, sind die Auswirkungen dieser Prozesse von der Grösse des Abflusses abhängig. Die gesamte Leistung (Energieinput pro Zeiteinheit)

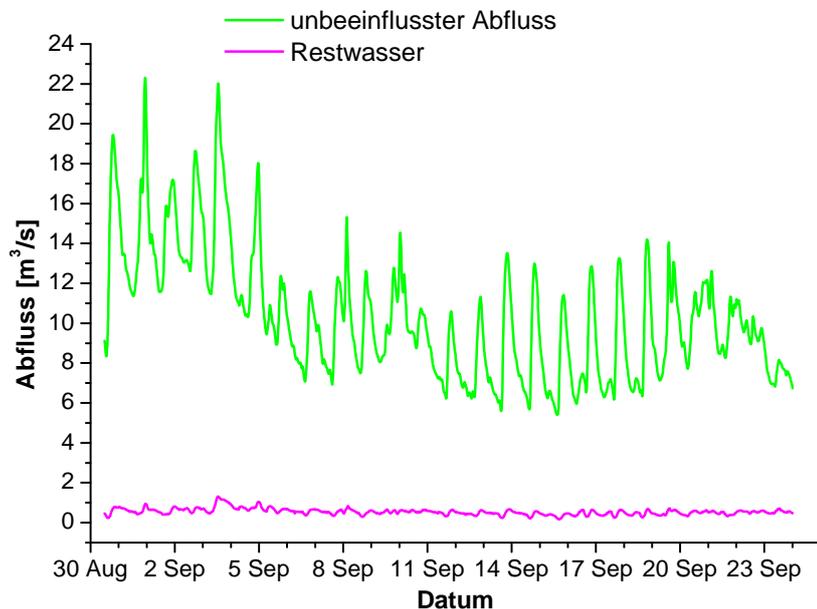


Abbildung 9.1: Prognostizierte Abflussmenge der Lonza für den Wasserabfluss mit und ohne Wassernutzung für den Sommer 02.

über die Strecke Kippel-Gampel während der Untersuchungsperiode kann, für alle Prozesse zusammen, aus der Temperaturerwärmung und den Abflussmengen bestimmt werden (Formel 9.1).

$$\Delta W = \Delta T \cdot c_p \cdot Q \cdot \rho \quad (9.1)$$

ΔW : Energieänderung pro Zeit [W]

ΔT : Temperaturdifferenz [K]

c_p : Wärmekapazität von Wasser [4182 J/kg/K]

Q : Abfluss [m^3/s]

ρ : Dichte von Wasser [$1000 kg/m^3$]

(9.2)

Die Leistung der Austauschprozesse beträgt für den Restwasserabfluss (inklusive des Abschnitts Kippel-Ferden) im Schnitt 8.2 MW, für den unbeeinflussten Abfluss 19.5 MW. Trotz des grösseren Wärmeinputs nimmt die Temperatur des unbeeinflussten Flusses weniger stark zu, da die Wärme auf eine viel grössere Wassermenge verteilt werden muss.

Die grössere Energieaufnahme beim unbeeinflussten Abfluss stammt hauptsächlich von der gegenüber dem Restwasser vergrösserten Bachbreite, bzw. Oberfläche. Die Bachbreite ist abhängig vom Abfluss, von der Geometrie des Bachbettes, dem Gefälle und den Reibungseigenschaften.

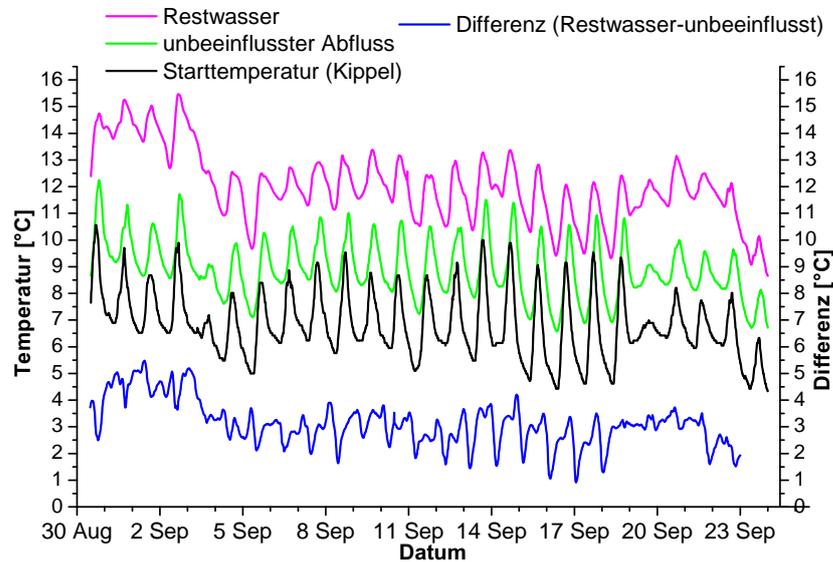


Abbildung 9.2: Simulierte Wassertemperatur für den aktuellen und den hypothetischen unbeeinflussten Abfluss der Lonza in Gampel, Starttemperatur in Kippel, sowie die Temperaturdifferenz zwischen dem beeinflussten und dem unbeeinflussten Zustand während der untersuchten Zeitperiode im Sommer 02.

Neben der grösseren Oberfläche wird die grössere Wärmeaufnahme bzw. kleiner Abgabe im Sommer mit zunehmendem Abfluss auch durch die tiefere Wassertemperatur bei höherem Abfluss begünstigt. Wenn man die Energieflüsse mit der Flussoberfläche normiert, sieht man, dass die tiefere Wassertemperatur zu einem geringeren Wärmeverlust durch die langwellige Ausstrahlung und die Verdunstung (Evaporation) und zu einem grösseren Wärmeinput (oder zu kleinerem Wärmeverlust wenn die Lufttemperatur unter die Wassertemperatur sinkt) durch die Konvektion führt. Die Prozesse Solarstrahlung und langwellige Ausstrahlung sind dagegen unabhängig von der Wassertemperatur. Wenn die Sedimenttemperatur nur vom Wärmeaustausch mit dem Fluss abhängig ist und das Sediment sonst keine zusätzliche Wärme aufnimmt oder abgibt, ist dieser Prozess, über die Zeit betrachtet, nach einer gewissen Äquilibrierungszeit ebenfalls unabhängig von der Wassertemperatur.

Ein Vergleich der sich mit der Wassertemperatur verändernden Energieflüsse (langwellige Ausstrahlung, Evaporation und Konvektion) pro Quadratmeter Oberfläche ist in der Abbildung 9.3 dargestellt. Die absolute Auswirkung ist abhängig von der Differenz der Wassertemperaturen. Im dargestellten Fall (1 km vor Gampel in der engen Schlucht, durchschnittlicher Temperaturunterschied $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) führt die niedrige Wassertemperatur zu einem im Durchschnitt höheren Wärmeinput bei einem Zustand ohne hydroelektrische Nutzung mit hohem Abfluss. Wenn man die oberflächenabhängigen Energieaustauschprozesse (kurzwellige Ausstrahlung, Evaporation, Konvektion, Solarstrahlung und langwellige Einstrahlung) zusammen betrachtet, beträgt der totale Wärmefluss bei den

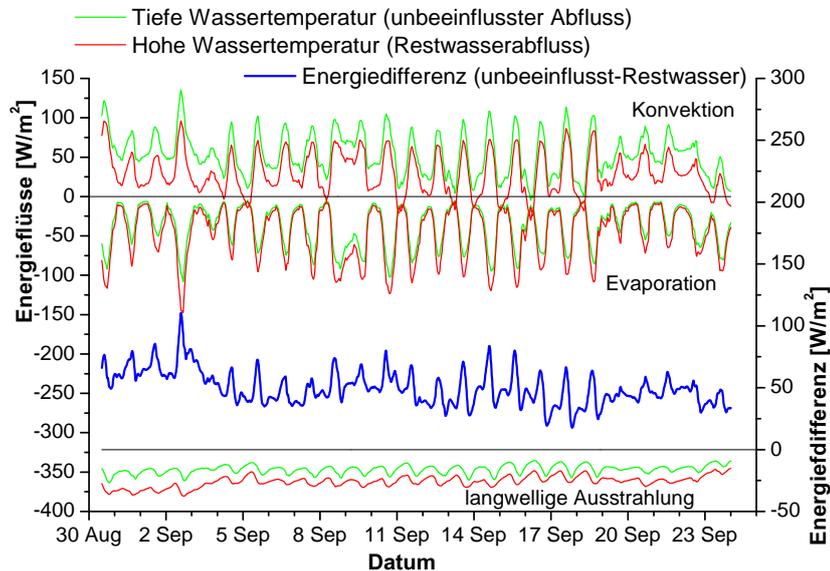


Abbildung 9.3: Simulierte Energieflüsse für die Konvektion (oberstes Kurvenpaar), die Evaporation (Mitte) und die langwellige Ausstrahlung (unteres Kurvenpaar) jeweils für den unbeeinflussten Fluss (grüne Kurven) und den Restwasserabfluss (rote Kurve) für die Lonza 1 km vor Gampel. Die blaue Kurve entspricht der Energiedifferenz aller Energieflüsse zwischen dem unbeeinflussten und dem Restwasserabfluss.

tiefere Temperaturen des ungenutzten Flusses $64 W/m^2$, während der Input bei der Restwassersituation mit hohen Temperaturen nur $14 W/m^2$ ist. Der relative Unterschied zwischen diesen Energiesummen ist so gross, weil der positive Beitrag der Solarstrahlung (und somit der absolute Energieinput) an dieser schattigen Stelle klein ist.

Im Winter, wenn das Wasser durch die Wärmeaustauschprozesse mit der Atmosphäre mehr Energie abgibt als es aufnimmt, kühlt sich die Restwasserstrecke auf Grund des geringeren Volumens schneller ab als der ungenutzte Fluss. Bei dieser umgekehrten Situation wird durch die tiefere Temperatur und die geringere Bachbreite auf der Restwasserstrecke gesamthaft weniger Energie abgegeben.

9.2 Temperaturvergleich nach der Rückleitung des hydroelektrisch genutzten Wassers

Die simulierten Temperaturen am Ende der Lonza kurz vor der Mündung in die Rhône sind in der Abbildung 9.4 eingezeichnet.

Während sich der Temperaturgang der Simulation bei unbeeinflusstem Abfluss vom Messpunkt vor Gampel bis zur Rhônemündung, wegen der kurzen Strecke und den fehlenden Zuflüssen, praktisch nicht verändert, sieht man bei

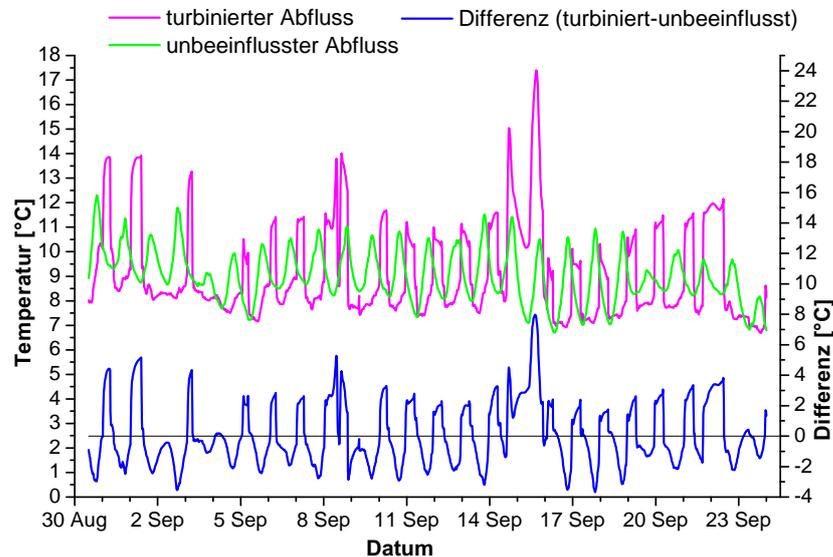


Abbildung 9.4: Simulierte Wassertemperatur für den aktuellen und den hypothetischen unbeeinflussten Abfluss der Lonza, sowie die Temperaturdifferenz zwischen dem turbinierten und dem unbeeinflussten Abfluss vor der Mündung in die Rhône während der untersuchten Zeitperiode im Sommer 02.

der Simulation der aktuellen Situation, dass durch den alternierten Kraftwerksbetrieb grossen Schwankungen verursacht werden. Wird vom Wasserkraftwerk turbiniert, sinkt die Wassertemperatur auf das Niveau der Minima des unbeeinflussten Beispiels. Wenn im Kraftwerk kein Wasser turbiniert wird, steigt die Temperatur in der Lonza stark an und kann Werte erreichen, die bei der Simulation der Situation mit unbeeinflusstem Abfluss nicht vorkommen.

Bei der Analyse des Wärmeeintrags in die Rhône, müssen die gemessenen Temperaturwerte zusammen mit dem Abfluss betrachtet werden, da sonst der Beitrag der hohen Temperaturen bei niedrigem Abfluss überschätzt wird. Deshalb werden in der Abbildung 9.5 die simulierten Abflüsse dargestellt.

Die Summe des Wassereinflusses der Lonza in die Rohne beträgt in den Simulationen während der Simulationsperiode (31.8 bis 24.9 02) mit und ohne Kraftwerk fast gleich viel. Bei unbeeinflusstem Wasserregime beträgt der mittlere Abfluss $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$, mit der Wassernutzung $9.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (wobei $9.3 \text{ m}^3/\text{s}$ turbiniert wurden). Die Differenz während der Beobachtungszeit wird im Stausee gespeichert.

Um die Differenz des Wärmeeintrags beider Szenarien in die Rhône zu quantifizieren, werden die Leistungen der beiden Zuflusssituationen mit der Formel 9.1 (Referenztemperatur 0°C) berechnet und danach daraus die Differenz bestimmt. Um die kleine Differenz der Wassermengen von $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ auszugleichen, wird die unbeeinflusste Wassermenge nach unten korrigiert, so dass der Mittelwert auch $9.9 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Der unterschiedliche Energieeintrag zwischen den 2 Szenarien beträgt 49 MW , dies entspricht bei den angenommenen Abflussbe-

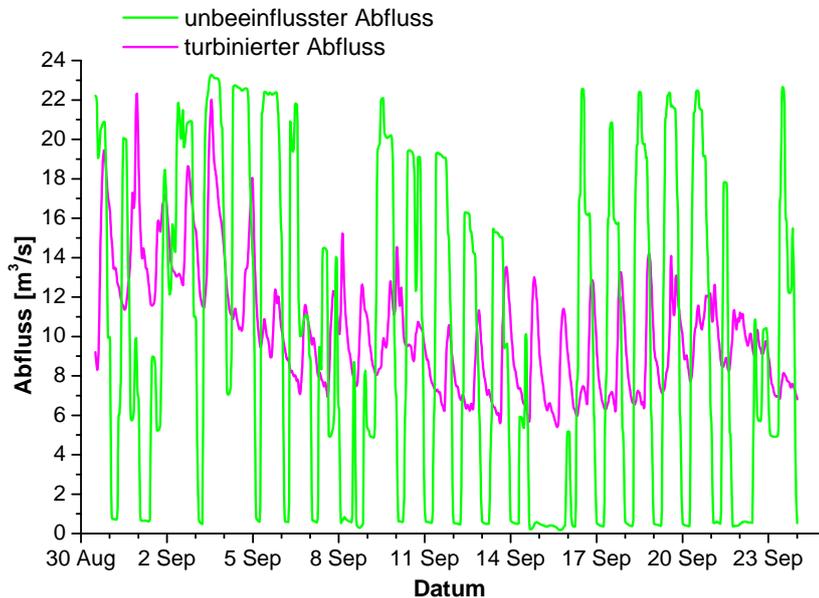


Abbildung 9.5: Prognostizierte Abflussmenge für den Wasserabfluss der Lonza vor der Mündung in die Rhône mit und ohne Wassernutzung für den Sommer 02.

dingungen von $9.9 \text{ m}^3/\text{s}$ einer um 1.2°C höheren Wassertemperatur bei einer ungenutzten Lonza.

9.3 Energiedifferenz zwischen den zwei Szenarien

Der grosse Teil dieser Temperaturdifferenz wird durch die geringere Erwärmung des turbinierten Wassers infolge kleinerer Reibungsverluste bei der hydroelektrischen Nutzung verursacht. Das Kraftwerk nutzt die potentielle Energie des Wassers und wandelt sie teilweise in elektrische Energie um. Im normalen Flussbett würde diese Änderung der potentiellen Energie durch die Reibung ganz in Wärme umgewandelt. Bei einem Wirkungsgrad der Turbinen von 85% (nach Giesecke ein Überschlagswert für mittlere Kraftwerksanlagen [GM98]) werden 85% der Differenz der potentiellen Energien des turbinierten Wassers in elektrische Energie umgewandelt und stehen daher für die Wassererwärmung nicht zur Verfügung. Die restlichen 15% gehen durch Reibung, Umlenkung, Generatorverluste usw. für die Gewinnung elektrischer Energie verloren, werden aber grössten Teils in Form von Wärme wieder ans Wasser zurückgegeben. Die Kraftwerksleistung und damit die Energie, welche nicht für eine Erwärmung des Wassers zur Verfügung steht, kann mit der Formel 9.3 berechnet werden.

$$P = \eta_{tot} \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_f \cdot \quad (9.3)$$

$$\begin{aligned} P & : \text{elektrische Leistung [W]} \\ \eta_{tot} & : \text{Wirkungsgrad [-]} \\ \rho & : \text{Dichte von Wasser [1000kg/m}^3\text{]} \\ Q & : \text{Abfluss [m}^3\text{/s]} \\ g & : \text{Erdbeschleunigung [9.81m/s}^2\text{]} \\ h_f & : \text{Fallhöhe [m]} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Die Netto-Fallhöhe für das Kraftwerk beträgt im Mittel etwa 616 *m* (die Netto-Fallhöhe variiert je nach Wasserstand zwischen 631.8 *m* und 600.8 *m* [Eid73]). Daraus lässt sich unter Annahme eines 85% Wirkungsgrades eine Produktion von elektrischer Energie von 48 *MW* bestimmen, welche bei einem ungenutzten Fluss zusätzlich der Flusserwärmung zur Verfügung stehen. Wie bei dem Vergleich zwischen den beiden Szenarien (hydroelektrisch genutzter/ungenutzter Fluss) gezeigt (Abschnitt 9.1), würde bei unverbautem Fluss ein zusätzlicher Input von nicht-dissipativer Energie von ca. 11 *MW* zur zusätzlichen Erwärmung, also insgesamt 59 *MW* zur Verfügung stehen. Daraus errechnet sich für die ursprüngliche Situation ohne energetische Wassernutzung eine im Schnitt um 1.4°C höhere Wassertemperatur.

Diese Temperaturdifferenz von 1.4°C ist 0.2°C höher als die auf Grund des Modells simulierten Temperaturkurven bei der Lonzamündung in die Rhône erwarten lassen (Abschnitt 9.2). Ein Grund dafür ist: Bei der Modelleichung der Strecken Blatten-Kippel und bei der Überlaufmodellierung der Strecke Ferdengreber hat man gesehen, dass die Temperaturzunahme auf diesen Strecken gegenüber den Messungen zu tief modelliert wird, was die Differenz erklären kann. Ein Teil der Differenz kann möglicherweise dadurch entstehen, dass die Energieproduktion mit der Formel 9.3 (z.B. zu grosse mittlere Fallhöhe) etwas überschätzt worden ist.

Beim Vergleich der beiden Energiebeiträge sieht man, dass das Verhältnis der Inputs nicht-dissipativer Energien zur Reibungswärme auf der Strecke Ferdengampel nur etwa 2:9 beträgt. Der relativ geringe Energiebeitrag der Strecke kann mit der Beschattung und der somit fehlenden Solareinstrahlung erklärt werden. Ist die Beschattung kleiner, wird der Energieinput durch die Solarstrahlung grösser und somit auch die Differenz zwischen den beiden Szenarien.

Kapitel 10

Diskussion

In den Feldaufnahmen und den Simulationen der Rhône-Seitenflüsse Lonza und Borgne konnte festgestellt werden, dass die Kraftwerke auf die Wassertemperatur in diesen hydroelektrisch genutzten Flüssen einen grossen Einfluss haben. Die Summe dieser Temperaturveränderungen wird auch an die Rhône weitergegeben.

10.1 Einflüsse hydroelektrischer Kraftwerke auf die Temperatur der Restwasserstrecke

Wird von einem Flussabschnitt Wasser abgezweigt, führt dies geometrisch zu einer proportional grösseren Verringerung des Volumens als der Wärmeaustauschfläche. Die Temperaturzunahme durch die Reibung ist dagegen unabhängig von der Wassermenge und spielt deshalb für die zusätzliche Erwärmung der Restwasserstrecke durch Wasserkraftnutzung keine Rolle. Die Energieflüsse und andere Effekte (z.B. warme Zuleitungen) wirken sich bei einer kleinen Wassermenge stärker auf die Wassertemperatur aus. An warmen Sommertagen mit stark positiven Energieflüssen kann die Temperatur in den Restwasserstrecken stark erhöht sein. Während der Untersuchungsperiode im September 02 wurde für die Lonza bei reduziertem Abfluss eine gegenüber dem unbeeinflussten Zustand um 3.1°C erhöhte Wassertemperatur modelliert. Bei der Modellierung fällt die Temperaturdifferenz etwas zu gross aus, da das Modell bei Simulation von Situationen mit grossem Abfluss auf der Restwasserstrecke die Erwärmung etwas unterschätzt.

Wenn im Winter das Total der Energieflüsse (ohne Reibungswärme/Dissipation) in den Fluss negativ ist, nimmt die Wassertemperatur auf der Restwasserstrecke wegen des geringeren Volumens stärker ab.

10.2 Einflüsse hydroelektrischer Kraftwerke auf den Energieinhalt der Restwasserstrecke

Die Grösse der Energieflüsse: langwellige Einstrahlung, Solarstrahlung, langwellige Ausstrahlung, Konvektion, Evaporation und der Austausch mit dem Sediment ist proportional zur Flussoberfläche. Ein unbeeinflusster Fluss mit

höherem Abfluss hat gegenüber einem Restwasser eine vergrösserte Wasseroberfläche. Im Sommer, wenn die Summe der Energieaustauschprozesse in den Fluss ein positives Vorzeichen hat, nimmt ein unbeeinflusster Fluss gegenüber einem kleinen Restwasser im gesamten mehr Energie auf. Bei der Lonza wurde aus der Differenz zwischen der Temperatur in Kippel und der modellierten Wassertemperatur am Ende der Restwasserstrecke der Energiezuwachs für beide Szenarien bestimmt. Der unbeeinflusste Fluss nimmt insgesamt 11.3 MW (19.5 MW bei hohem, unbeeinflusstem Abfluss und 8.2 MW bei Restwasserabfluss) mehr Energie auf. In dieser Differenz sind auch die Effekte des Stausees bei Ferden eingeschlossen.

Neben den Auswirkungen der geringeren Oberfläche wird die verringerte Gesamtenergieaufnahme bei reduziertem Restwasserabfluss noch durch zusätzliche, von der Wassertemperatur abhängige Prozesse verstärkt. Mit der Zunahme der Wassertemperaturen nehmen die Energieverluste durch die langwellige Abstrahlung und die Evaporation pro Fläche zu und der Wärmeinput pro Fläche durch die Konvektion ab. Im Sommer, wenn das Wasser der Restwasserstrecke gegenüber einem unbeeinflussten Abfluss eine höhere Temperatur aufweist, führt dies zu einer höheren Energieabgabe bzw. zu einer insgesamt geringeren Energieaufnahme pro Quadratmeter auf der Restwasserstrecke. Im Abschnitt 3 der Lonza kurz vor Gampel (an einem Ort mit einer Wassertemperaturdifferenz von 3.1°C und grosser Beschattung) wurde für den Energieinput bei Restwasser ein Wert von 14 W/m^2 berechnet, während er bei einem hohen Abfluss ohne Wasserentnahme zur hydroelektrischen Energiegewinnung 64 W/m^2 beträgt.

Im Winter verliert die Restwasserstrecke insgesamt (geringere Oberfläche) und proportional (tiefere Wassertemperatur) weniger Energie.

10.3 Hydroelektrische Nutzung

Die Differenz der potentiellen Energie des Wassers wird im natürlichen Bachbett praktisch zu 100% in Wärme umgewandelt. Bei der hydroelektrischen Nutzung wird ca. 85% dieser potentiellen Energie in Elektrizität umgewandelt und das Wasser wird nur durch die restlichen 15% der Energie erwärmt. Das turbinierete Wasser weist deshalb bei der Ausleitung aus dem Kraftwerk eine deutlich tiefere Temperatur als das Wasser sowohl des energetisch ungenutzten Flusses wie des Restwassers auf.

Die Rückleitung des Kraftwerkswassers führt so zu einer Abkühlung der Wassertemperatur im Fluss. Wird das Kraftwerk zudem alternierend betrieben, kann der stark variierende Wasserinput zu grossen Temperatursprüngen auf der Einleitungsstrecke führen. In der Lonza wurden Temperatursprünge bis zu 8°C gemessen.

Der Energieverlust für das Gewässersystem durch die hydroelektrische Nutzung kann aus der Energiebilanz abgeschätzt werden. Für das Kraftwerk Löt-schen der Lonza (Höhendifferenz 616 m) kann für den turbinierten Abfluss von $9.3\text{ m}^3/\text{s}$ während der Untersuchungsperiode ein Energieverlust für den Fluss von 48 MW berechnet werden. Gegenüber dem Zustand mit einem ungenutzten Abfluss von $9.9\text{ m}^3/\text{s}$ ergibt dies eine Wassertemperaturerniedrigung von 1.4°C .

10.4 Summierte Auswirkungen auf den Unterlauf der Lonza vor der Rhônemündung

Über die Zeit betrachtet, führen im Sommer die Veränderungen auf der Restwasserstrecke und durch das Kraftwerk, verglichen mit den Verhältnissen ohne hydroelektrische Nutzung, zu einer Energieverringerung im genutzten Bach.

Für die Lonza wurde in den Simulationen eine durchschnittliche Abkühlung im hydraulisch genutzten Fluss von 1.2°C berechnet. Wenn man die beiden Prozesse, weniger Reibungswärme durch hydroelektrische Nutzung und geringere Energieaufnahme auf der Restwasserstrecke infolge einer verringerten Wasseroberfläche, einzeln berechnet, fällt die Temperaturdifferenz sogar um 0.2°C höher aus.

Die relative Grösse der beiden Effekte zueinander ist stark von flusspezifischen Gegebenheiten abhängig. Auf einer stark beschatteten Restwasserstrecke mit einem grossen hydraulisch genutzten Gefälle überwiegt der Einfluss der hydroelektrischen Nutzung deutlich. In der Lonza beträgt das Verhältnis nicht-dissipativer Wärmefflüsse und durch die hydroelektrische Nutzung abgezweigte Reibungswärme 2:9.

10.5 Extrapolation auf das Einzugsgebiet der Rhône bis Martigny

Wie aus der Karte (Abbildung 3.1) ersichtlich, wird das Wasser in allen grösseren Seitentälern des Wallis hydroelektrisch genutzt.

Der Wärmeverlust durch die hydroelektrische Nutzung des Wassers kann aus den Produktionszahlen der Kraftwerke quantifiziert werden. Als grobe Schätzung kann aus den Produktionszahlen aller Walliser Kraftwerke mit der Formel 9.3 aus dem Kapitel 9 eine untere Grenze für die Temperaturdifferenz zwischen dem hydraulisch genutzten und einem hypothetischen unbeeinflussten Zustand quantifiziert werden. Im Anhang C wurde der durchschnittliche Wärmeverlust der Rhône durch die hydroelektrische Nutzung im Sommer und im Winter bis nach Martigny quantifiziert. Der Erwartungswert für den Wärmeverlust (Energieproduktion der Kraftwerke) im Sommer (April bis September) beträgt 924 MW , im Winter sind es 840 MW . Die Auswirkung auf die Wassertemperatur ist abhängig vom Abfluss. Um diesen einzubeziehen, werden die durchschnittlichen monatlichen Abflussmengen des BWG in Branson kurz vor Martigny verwendet. Allein durch die hydroelektrische Gewinnung von Energie erleidet die Rhône im Sommer einen durchschnittlichen Temperaturverlust von 1.2°C im Sommer.

Die Auswirkungen auf die Restwasserstrecken können aus diesen Untersuchungen nicht ohne Modifikation übertragen werden. Unterschiedliche Geometrie des Bachbettes, der Beschattung und der Länge der Fliessstrecke müssen berücksichtigt werden. Wenn man die Verhältnisse bei der Lonza als einzige verfügbare Schätzung heranzieht, ergibt sich durch den geringeren Wärmeinput auf der Restwasserstrecke eine zusätzliche Temperaturreduktion von 0.3°C .

Dabei ist zu beachten, dass die Energiedifferenz zum unbeeinflussten Abfluss sich vergrössert, wenn die Wasserbreite mit steigendem Abfluss stärker zunimmt, die Beschattung klein ist und die Restwasserstrecke eine lange Fliessstrecke (geringes Gefälle) aufweist. Im Einzugsgebiet der Rhône herrschen in den meisten

Seitenflüssen eher andere Bedingungen: Die Flüsse fließen in eng eingeschnittenen Tälern mit grossem Gefälle, wobei die Wasseroberfläche mit zunehmendem Abfluss nicht wesentlich zunehmen kann. Die Beschattung ist in den engen Tälern zwischen den hohen Bergen gross, so dass die Energieaufnahme auf der Restwasserstrecke von untergeordneter Bedeutung ist.

Im Winter ist das Verhältnis von turbiniertem zu nicht turbiniertem Wasser noch grösser. Dadurch ist der Wärmeverlust durch verlorene Reibung noch grösser als im Sommer. Die Verhältnisse auf den Restwasserstrecken wurden im Winter nicht analysiert. Sie unterscheiden sich von den Verhältnissen im Sommer zum Teil wesentlich (Energieverlust anstatt Energieaufnahme aus der Atmosphäre). Deshalb sind aus diesen Untersuchungen keine quantitativen Aussagen über die Verhältnisse im Winter möglich.

10.6 Einflüsse der grossen Stauseen

Die Lonza weist keinen grossen Stausee auf. Deshalb berücksichtigen diese Untersuchungen an der Lonza die Einflüsse der grossen Stauseen im Einzugsgebiet der Rhône nicht. Im Gegensatz zu den Laufkraftwerken wird das Wasser in diesen Speicherkraftwerken über längere Zeit gespeichert. Unsere Temperaturmessung in den Stauseen Grande Dixence, Mauvoisin und Emosson haben gezeigt, dass das gespeicherte Wasser nur eine geringe Wärmemenge aufnimmt [Fre02]. Die Stauseen haben eine zur Wassertiefe relative kleine Wasseroberfläche. Zudem weisen diese Stauseen teilweise eine grosse Trübung auf. Dadurch werden nur die obersten Zentimeter erwärmt. In den hohen Lagen der Stauseen wird diese Wärme während der Nacht wieder an die Atmosphäre abgegeben. Dadurch hat das Wasser in den Stauseen praktisch über die ganze Tiefe eine Temperatur um $4-5^{\circ}\text{C}$. Das turbinierte Wasser stammt zudem aus den untersten Schichten, so dass in die Rhône nur kaltes Tiefenwasser eingeleitet wird.

Einen grossen Einfluss haben die Stauseen auch auf den Wasserhaushalt, da durch die Speicherung ein Teil des Wasserabflusses vom Frühling und Sommer in den Winter verlagert wird. Dabei vergrössert sich im Winter das Verhältnis von turbiniertem zu nicht turbiniertem Wasser.

10.7 Ausblick

Um die Auswirkungen hydroelektrischer Kraftwerke auf die Rhône noch genauer zu quantifizieren, ist es nötig, die Abfluss- und Temperaturdaten von Kraftwerken und Restwasserstrecken mit grösserer zeitlicher Auflösung zu analysieren.

Um den geringeren Wärmeinput in die Restwasserstrecke bei anderen Flüssen zuverlässiger abschätzen zu können, muss die Abhängigkeit des Energieflusses von der Wasseroberfläche, der Beschattung und den metrologischen Bedingungen auch bei den anderen Gewässern erfasst werden.

Um eine genaue Aussage über die Auswirkungen der Kraftwerke auf die Temperatur der Rhône machen zu können, wäre es interessant, eine Wärmebilanz vor und nach den Kraftwerksinstallationen für das ganze Einzugsgebiet zu rekonstruieren.

Bei weiteren Modellierungen in der Lonza, könnte auch die Simulation einer Wintersituation neue Erkenntnisse liefern.

Möchte man nicht nur das Temperaturverhalten, sondern auch Stofftransporte mit einem grösseren Gradienten in der Lonza nachbilden, was mit diesem Modell durchaus möglich ist, müsste die Modellierung der Totzone weiter verfeinert werden, was weitere Tracerversuche erfordern würde.

Die biologischen Auswirkungen der Temperaturänderungen auf die Fischpopulation werden in der Arbeit von Stefan Küttel [Küt02] zusammengefasst. Er hat sich vor allem auf die Auswirkung von längerfristigeren Temperaturänderungen konzentriert. Weiter wäre es von Interesse, auch die Toleranz von verschiedenen Fischarten gegenüber sich in kurzer Zeit wiederholenden Temperaturschwankungen zu analysieren.

Literaturverzeichnis

- [Aes02] AESCHBACH: *Ingenieurgesellschaft Westschweiz: Daten über die Tunnelkühlung der Neat*, Oktober 2002.
- [Amt68] AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: *Natürliche und durch Ableitung beeinflusste Wasserführung der schweizerischen Gewässer*. Bern, 1968.
- [And54] ANDERSON, E.R.: *Energy buget studies, water loss inverstigations. Lake Hefner studies*. Prof. Paper No. 269, U.S. Geological Survey, 1954.
- [BB87] BROWN, L. C. und T. O. BARNWELL: *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*. Environmental Research Laboratory, Athens, 1987.
- [Bol49] BOLZ, H.M.: *Die Abhängigkeit der infraroten Gegenstrahlung von der Bewölkung*. Zeitschrift für Meteorologie, (3):201–203, 1949.
- [Bon98] BONJOUR, CYRILL: *Diplomarbeit: Modellierung des Wärmeaustausches über die Wasseroberfläche eines Gebirgsbachs*, September 1998.
- [Bro81] BROCK, THOMAS D.: *Calculating Solar Radiation for ecological Studies*. Ecological Modelling, 14:1–19, 1981.
- [Bru82] BRUTSAERT, WILFRIED H.: *Evaporation into the atmosphere theory, history, and applications*. Reidel, Dordrecht, 1982.
- [BW83] BENCALA, K. E. und R. A. WALTERS: *Simulation of solute transport in a mountain pool-and riffle stream: Atransient storage model*. Water Resources Research, 19(3):732–738, 1983.
- [BWG01] BWG: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bundesamt für Landeshydrologie, 2001.
- [EAW] EAWAG: www.aquasim.eawag.ch.
- [Eid73] Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschafts-DEPARTEMENT: *Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz auf 1. Januar 1973*. Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1973.
- [Eid02] Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft: *Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz*. Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1928-02.

- [ERE98] EVANS, E. C., MCGREGOR G. R. und PETTS G. E.: *River energy budgets with special reference to river bed processes*. Hydrological Processes, 12:575–595, 1998.
- [Fis75] FISCHER, H.B.: *Simple method for predicting dispersion in streams*. Journal of the Environmental Engineering Division-ASCE, 101(3):453–455, 1975.
- [FR00] FLÜHLER, HANNES und KURT ROTH: *Bodenphysik - Physik der ungesättigten Zone*. ETH Zürich, 2000.
- [Fre02] FREY, MARTIN: *Interner Arbeitsbericht: Bericht über die Messungen in den Stauseen*. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), CH-6047 Kastanienbaum, 2002.
- [GM98] GIESECKE, JÜRGEN und EMIL MOSONYI: *Wasserkraftanlagen Planung, Bau und Betrieb*. Springer, 1998.
- [GMA98] GU, RUOCHUAN, SHAWN MONTGOMERY und AUSTIN T. AL.: *Quantifying the effects of stream discharge on summer river temperature*, 1998.
- [Gra] *Grande Dixence*. Grande Dixence SA, Rue des Creusets 41; 1950 Sion.
- [HOJ82] HOCKEY, J.B., I.F. OWENS und TAPPER N. J.: *Empirical and theoretical models to isolate the effect of discharge on summer water temperatures in the Hurunui river*. Journal of Hydrology, 21(1):1–12, 1982.
- [Jor02] JORDAN, JEAN-FRANÇOIS: *Rhonewerke AG: Daten über den Kraftwerksbetrieb*, November 2002.
- [KRM98] KOUSSIS, ANTONIS D. und J. RODRIGUEZ-MIRASOL: *Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams*. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 124(3):317–320, 1998.
- [Kuh78] KUHN, W.: *Aus Wärmehaushalt und Klimadaten berechnete Verdunstung des Zürichsees*. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, (4):261–283, 1978.
- [Küt02] KÜTTEL, STEFAN: *Diplomarbeit: Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer*, 2002.
- [Mei96] MEIER, WERNER K.: *Diplomarbeit: Veränderungen des Temperaturhaushaltes der Aare durch das Kraftwerk Mühleberg*, 1996.
- [Mei02] MEIER, WERNER K.: *Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen*. Doktorarbeit, ETH Zürich, April 2002.
- [Met] METEOSCHWEIZ: www.meteoschweiz.ch.
- [MH94] MIDHAT, HONDZO und G. STEFAN HEINZ: *Riverbed heat conduction prediction*. Water Resources Reserach, 30(5):1503–1513, 1994.

- [Mor72] MORSE, WILLIAM L.: *Stream temperature prediction under reduced flow*. Journal of the Hydraulics Division, 6:10314–1047, 1972.
- [MPFO02] MARTY, CH., C. PHILIPONA, C. FRÖLICH und A. OHMURA: *Altitude dependence of surface radiation fluxes and cloud forcing in the alps: results from the alpine surface radiation budget network*. Theoretical and Applied Climatology, 72:137–155, 2002.
- [Rei98a] REICHERT, PETER: *Aquasim 2.0 - Tutorial*. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), CH-8600 Dübendorf, September 1998.
- [Rei98b] REICHERT, PETER: *Aquasim 2.0 - User Manual*. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), CH-8600 Dübendorf, September 1998.
- [RKR98] RICE, C.E., K.C. KADAVY und K.M. ROBINSON: *Roughness of loose rock riprap on steep slopes*. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 124(2):179–185, 1998.
- [Sch02] SCHWERY, MICHEL: *EnAlpina: Daten über den Kraftwerksbetrieb*, November 2002.
- [SN78] SABOL, G. V. und C. F. NORDIN: *Dispersion in Rivers as Related to Storage Zone*. Journal of the Hydraulics Division-ASCE, 104(5):695–708, 1978.
- [Sol02] SOLDATI, PATRICIA: *Leteygeon SA: Daten über den Kraftwerksbetrieb*, November 2002.
- [SS93] SINOKROT, BASHAR A. und HEINZ G. STEFAN: *Stream Temperature Dynamics: Measurements and Modeling*. Water Resources Reserach, 29(7):2299–2312, 1993.
- [Sta99] STAHEL, WERNER A.: *Statistische Datenanalyse*. Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1999.
- [Swi] SWISSDAMS: www.swissdams.ch.
- [TS70] THACKSTON, E. L. und K. B. SCHNELLE: *Predicting effects of dead zone on stream mixing*. Journal of the Sanitary Engineering Division-ASCE, 96(SA2):319–331, 1970.
- [Ver02] VERASANI, ADRIAN: *Schneller Ritz und Partner AG: Daten über das Baustellenabwasser der Neat*, November 2002.
- [Web96] WEBB, B.W.: *Trends in stream and river temperature*. Hydrological Processes, 10:205–226, 1996.
- [Yen73] YEN, B.C.: *Open Channel flow equations*. Journal of the Engineering Mechanics Division-ASCE, 101(4):485–487, 1973.

Anhang A

Messungen

Ort	Koordinaten	Zeitpunkt	Abflussmenge [l/s]
Riti	624310/136200	18.10.02 15:25	40
Goppenstein (oberhalb)	624300/135570	18.10.02 14:10	112
Goppenstein (unterhalb)	624460/134440	18.10.02 12:05	170
Greber	624650/133570	05.10.02 15:20	424
Greber	624650/133570	05.10.02 15:20	423
Greber	624650/133570	12.10.02 17:15	277
Gampel 2	623570/129340	04.10.02 16:15	165
Gampel 1	623525/129320	12.10.02 10:55	394

Tabelle A.1: Durchgeführte Abflussmessungen in der Lonza, flussabwärts aufgelistet.

Ort	Koordinaten	Zeitpunkt	Abflussmenge [l/s]	Streckenlänge [m]
Pramousse	603840/98670	15.10.02 12:20	230	145
Les Haudères (Borgne d'Arolla)	605090/103400	14.08.02	1530	77
Les Haudères (Borgne d'Arolla)	605090/103400	15.10.02 16:50	680	81
Les Haudères (Borgne de Ferpècle)	605125/103460	14.08.02	1150	103
La Lulette (vor dem Stausee)	600105/112230	16.10.02 14:00	1790	
Euseigne (vor Zufluss Dixence)	598550/114270	14.08.02	20	30
Euseigne (vor Zufluss Dixence)	598550/114270	09.10.02 13:50	16	
Euseigne (vor Zufluss Dixence)	598550/114270	16.10.02 10:20	7	30
Dixence	598420/114190	14.08.02	100	143.5
Dixence	598420/114190	16.10.02 09:10	80	143.5
Pont de Riva	598000/115630	09.10.02 10:30	280	

Tabelle A.2: Tracermessungen in der Borgne, flussabwärts aufgelistet.

Ort	Koordinaten	Zeitpunkt	Temperatur [°C]	Breite [m]	Abfluss [l/s]
Zufluss ohne Namen	603630/95775	15.10.02 16:20	6.5		
Zufluss ohne Namen	603345/95995	15.10.02 16:25	5.1		
La Monta	603650/96540	15.10.02 16:30	5.5	2	
Pramousse	603845/98655	15.10.02 15:30	6.4	4-6	230
Satarma	603915/99620	15.10.02 15:20	7.8	4-5	
Zufluss ohne Namen	603900/99645	15.10.02 15:25	6.3		ca. 50
Zufluss T. de la Maresse (Höhe Strasse)	603980/102670	15.10.02 15:10			40-50
Zufluss Bornetta (Strasse oben)	604380/103195	15.10.02 15:00	8.5		
Zufluss Bornetta (Strasse unten)	604995/103035	15.10.02 14:50	8.3		ca. 25-30
Brücke vor Les Haudères	605095/103035	15.10.02 12:20	5.6	5-6	680
Borgne d'Arolla in Les Haudères	605115/103460	15.10.02 12:50			680

Tabelle A.3: Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne d'Arolla zwischen Arolla und Les Haudères.

Ort	Koordinaten	Zeitpunkt	Temperatur [°C]	Breite [m]	Abfluss [l/s]
Evolène	604005/106900	16.10.02 15:15	8.1	7-8	>1000
Zufluss T. de Martemo (oberhalb der Strasse)	603615/107850	16.10.02 15:35	7.8		
Villetta	601990/109970	16.10.02 15:45	8.3		
Grand Torrent (unterhalb der Strasse)	601840/110390	16.10.02 15:55	7.7		
T. de Proton (oberhalb der Strasse)	601170/111235	16.10.02 16:05	9.4		ca. 10
Pont Noir de Lugneré	600660/111570	16.10.02 15:00	8.2		
Torrent de Liex	600550/111740	16.10.02 16:15			ca. 15
La Luette (nach dem Stausee)	600105/112230	16.10.02 13:55	7.8		1800
La Luette (nach dem Stausee)	599810/112440	16.10.02 13:15	9.8	1-3	<5
T. de la Mounire (oben)	599925/112480	16.10.02 13:10	8.9		
T. de la Mounire (bei der Mündung)	599785/112510	16.10.02 13:25	9.5		
Euseigne	599010/113795	09.10.02 15:50	10.1	1-3	40

Tabelle A.4: Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne zwischen Les Haudères und dem Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne.

Ort	Koordinaten	Zeitpunkt	Temperatur [°C]	Breite [m]	Abfluss [l/s]
Les Grangettes	598520/114290	10.10.02 13:40	8.3	2-4	
Einfluss aus Rohr	598410/114440	10.10.02 13:25	12.2		ca. 5
Combioula	598340/114850	10.10.02 12:45	8.7	4-8	ca. 5
Borgne vor Becken	598260/115050	10.10.02 12:15	8.4		
Zufluss aus Becken	598260/115050	10.10.02 12:15	27.2		ca. 20
Borgne nach Becken	598220/115120	10.10.02 12:15	11.5		ca. 150
Zufluss La Manna	598260/115050	10.10.02 11:40	7.1		ca. 130
Borgne nach Zufluss	598010/115510	10.10.02 11:30	10.5	3-6	280
Pont de Riva	598000/115630	10.10.02 10:25	9.5	3-6	280
Borgne	598110/117700	09.10.02 17:05	10.9	3-6	
Borgne	597850/118270	09.10.02 16:20	10.5	2-7	
Zufluss aus Tunnel	597700/118990	09.10.02 15:15	5.8		
Borgne	597690/119060	09.10.02 15:15	10.1		
Borgne (Ende Kanal)	597550/119270	09.10.02 13:10	9.2	10.5	
Einflusskraftwerk	597530/119330	09.10.02 13:00	5.1		
Borgne	597140/119780	09.10.01 11:00		10.5	
Borgne	596960/119330	09.10.02 10:50		10	
Borgne	595680/121400	09.10.02 09:50	5.4	11	

Tabelle A.5: Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne zwischen Euseigne und Bramois.

Anhang B

Unsicherheitsanalyse

Parameter	Wertebereich	Standard- abweichung	Fehlerbeitrag [°C]
T_{lat}	$T_W + 2^\circ C$	$2^\circ C$	$3.53 \cdot 10^{-1}$
$T_{Blatten}$ (Input)	$3-10^\circ C$	$0.2^\circ C$	$1.93 \cdot 10^{-1}$
H_S^g	$0-900 W/m^2$	$50 W/m^2$	$7.73 \cdot 10^{-2}$
$Q_{ZU,BK}$	$0-8 m^3/s$	$0.5 m^3/s$	$6.67 \cdot 10^{-2}$
k_b	0.1	0.2	$6.63 \cdot 10^{-2}$
k_{sed}	$2 \cdot 10^6 J/K/m^2$	$2 \cdot 10^6 J/K/m^2$	$4.68 \cdot 10^{-2}$
$Q_{Blatten}$ (Input)	$3-18 m^3/s$	$0.5 m^3/s$	$4.31 \cdot 10^{-2}$
C	0-1	0.3	$3.99 \cdot 10^{-2}$
S_0	4%	0.1%	$3.94 \cdot 10^{-2}$
K	$60 Wm^{-2}K^{-1}$	$30 Wm^{-2}K^{-1}$	$3.81 \cdot 10^{-2}$
w_{bed}	14 m	2 m	$3.40 \cdot 10^{-2}$
f	1.2	0.5	$3.35 \cdot 10^{-2}$
f_s	0.1	0.1	$2.85 \cdot 10^{-2}$
T_A	$2-21^\circ C$	$0.5^\circ C$	$1.25 \cdot 10^{-2}$
α	0.7	0.35	$1.03 \cdot 10^{-2}$
p_1	$13 W/m^2/mbar$	$3 W/m^2/mbar$	$7.11 \cdot 10^{-3}$
B	0.66	0.045	$5.08 \cdot 10^{-3}$
p_2	$0.86 Ws/m^2/mbar/m$	$0.4 Ws/m^2/mbar/m$	$2.63 \cdot 10^{-3}$
f_A	1	0.5	$2.59 \cdot 10^{-3}$
ϕ	0.04	0.2	$2.35 \cdot 10^{-3}$
p_3	$0.17 W/m^2/mbar/K$	$0.08 W/m^2/mbar/K$	$1.86 \cdot 10^{-3}$
LA	46.4°	0.1	$1.61 \cdot 10^{-3}$
$T_{sed,ini}$	$6.7-7.6^\circ C$	$0.5^\circ C$	$1.55 \cdot 10^{-3}$
LO	7.8°	0.1	$1.47 \cdot 10^{-3}$
p	850-880 mbar	10 mbar	$1.32 \cdot 10^{-3}$
Wurzel der Quadratsumme			0.43

Tabelle B.1: Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei Kippel im simulierten Streckenabschnitt Blatten-Kippel.

Parameter	Wertebereich	Standard- abweichung	Fehlerbeitrag [°C]
k_{sed}	$2 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	$2 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^2$	$7.70 \cdot 10^{-1}$
T_{lat}	T_W	$1 \text{ }^\circ\text{C}$	$4.62 \cdot 10^{-1}$
k_b	0.6	0.15	$3.95 \cdot 10^{-1}$
H_S^g	0-900 W/m^2	50 W/m^2	$3.28 \cdot 10^{-1}$
C	0-1	0.3	$3.24 \cdot 10^{-1}$
x_{Anteil}	0.166	0.1	$3.24 \cdot 10^{-1}$
f_s	0	0.1	$2.68 \cdot 10^{-1}$
$T_{Baustelle}$ (Input)	12 $^\circ\text{C}$	1.5 $^\circ\text{C}$	$1.81 \cdot 10^{-1}$
RH	0-1	0.1	$1.75 \cdot 10^{-1}$
$w_{bed,RG}$	4.5 m	1 m	$1.34 \cdot 10^{-1}$
T_{Riti} (Input)	6-14 $^\circ\text{C}$	0.2 $^\circ\text{C}$	$1.18 \cdot 10^{-1}$
$Q_{Baustelle}$ (Input)	0.035 m^3/s	0.02 m^3/s	$1.06 \cdot 10^{-1}$
TA	4-23 $^\circ\text{C}$	0.5 $^\circ\text{C}$	$7.75 \cdot 10^{-2}$
K	120 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	40 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	$7.33 \cdot 10^{-2}$
p_1	13 $\text{W/m}^2/\text{mbar}$	3 $\text{W/m}^2/\text{mbar}$	$7.03 \cdot 10^{-2}$
f_{RG}	f	1	$6.24 \cdot 10^{-2}$
S_0	6%	0.2%	$6.21 \cdot 10^{-2}$
β_{RG}	0.42	0.1	$5.98 \cdot 10^{-2}$
$w_{bed,GG}$	3 m	1 m	$5.85 \cdot 10^{-2}$
α_{RG}	1.2	0.25	$5.53 \cdot 10^{-2}$
f_{GG}	f	1	$3.93 \cdot 10^{-2}$
β_{GG}	0.35	0.1	$3.63 \cdot 10^{-2}$
f_A	0.8	0.5	$2.64 \cdot 10^{-2}$
$Q_{Stausee}$ (Input)	0.1 m^3/s	0.005 m^3/s	$2.60 \cdot 10^{-2}$
B	0.65	0.045	$2.23 \cdot 10^{-2}$
p_2	0.86 $\text{Ws/m}^2/\text{mbar/m}$	0.4 $\text{Ws/m}^2/\text{mbar/m}$	$1.97 \cdot 10^{-2}$
α_{GG}	0.9	0.25	$9.64 \cdot 10^{-3}$
p_3	0.17 $\text{W}/(\text{m}^2\text{mbarK})$	0.08 $\text{W}/(\text{m}^2\text{mbarK})$	$5.34 \cdot 10^{-3}$
p	880-910 mbar	10 mbar	$3.83 \cdot 10^{-3}$
$T_{sed,ini}$	10.6-12 $^\circ\text{C}$	0.5 $^\circ\text{C}$	$1.46 \cdot 10^{-3}$
LA	46.4°	0.1°	$1.46 \cdot 10^{-3}$
LO	7.8°	0.1°	$1.42 \cdot 10^{-3}$
$q_{ex,GG}^{pool}$	0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	$1.33 \cdot 10^{-3}$
$q_{ex,RG}^{pool}$	0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	$1.32 \cdot 10^{-3}$
Wurzel der Quadratsumme			1.22

Tabelle B.2: Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei Greber im simulierten Streckenabschnitt Riti-Greber.

Parameter	Wertebereich	Standard- abweichung	Fehlerbeitrag [°C]
T_{lat}	T_W	$1\text{ }^\circ C$	$6.42 \cdot 10^{-1}$
k_b	0.78	0.1	$4.96 \cdot 10^{-1}$
k_{sed}	$5 \cdot 10^6\text{ J/K/m}^2$	$3 \cdot 10^6\text{ J/K/m}^2$	$3.99 \cdot 10^{-1}$
f_s	0.15	0.1	$3.62 \cdot 10^{-1}$
C	0-1	0.3	$2.99 \cdot 10^{-1}$
x_{Anteil}	0.166	0.1	$2.72 \cdot 10^{-1}$
H_S^g	0-900 W/m^2	50 W/m^2	$2.23 \cdot 10^{-1}$
RH	0-1	0.1	$2.13 \cdot 10^{-1}$
w_{bed}	3 m	1 m	$1.47 \cdot 10^{-1}$
T_{Greber} (Input)	7-16° C	0.2 ° C	$1.46 \cdot 10^{-1}$
f	1	1	$1.10 \cdot 10^{-1}$
TA	7-28 ° C	0.5 ° C	$9.05 \cdot 10^{-2}$
β	0.35	0.1	$8.85 \cdot 10^{-2}$
K	120 $W/m^2/K$	40 $W/m^2/K$	$8.38 \cdot 10^{-2}$
p_1	13 $W/m^2/mbar$	3 $W/m^2/mbar$	$6.48 \cdot 10^{-2}$
B	0.65	0.045	$2.67 \cdot 10^{-2}$
α	0.9	0.25	$2.42 \cdot 10^{-2}$
f_A	0.5	0.5	$2.39 \cdot 10^{-2}$
p_2	0.86 $W s/m^2/mbar/m$	0.4 $W s/m^2/mbar/m$	$1.17 \cdot 10^{-2}$
S_0	10.2%	0.1%	$7.32 \cdot 10^{-3}$
p_3	0.17 $W/m^2/mbar/K$	0.08 $W/m^2/mbar/K$	$6.91 \cdot 10^{-3}$
$T_{sed,ini}$	11.4-12.4 ° C	0.5 ° C	$5.31 \cdot 10^{-3}$
p	920-950 mbar	10 mbar	$4.98 \cdot 10^{-3}$
q_{ex}^{pool}	0.06 m^2/s	0.1 m^2/s	$2.40 \cdot 10^{-3}$
LA	46.4°	0.1 °	$2.37 \cdot 10^{-3}$
LO	7.8°	0.1 °	$2.29 \cdot 10^{-3}$
Wurzel der Quadratsumme			1.14

Tabelle B.3: Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei der Lonza im simulierten Streckenabschnitt Greber-Gampel.

Parameter	Wertebereich	Standard- abweichung	Fehlerbeitrag [°C]
T_{KW} (Input)	8-16 °C	0.2 °C	$1.55 \cdot 10^{-1}$
x_{Anteil} (Input)	0.166	0.1	$1.39 \cdot 10^{-1}$
Q_{KW} (Input)	0-22 m ³ /s	0.5 m ³ /s	$1.32 \cdot 10^{-1}$
f	0.16	0.3	$8.40 \cdot 10^{-2}$
k_{sed}	$6.5 \cdot 10^5$ J/K/m ²	$3.25 \cdot 10^5$ J/K/m ²	$6.80 \cdot 10^{-2}$
$Q_{Zu,BF}$	1-7 m ³ /s	0.5 m ³ /s	$4.59 \cdot 10^{-2}$
T_{RW} (Input)	6-14 °C	0.2 °C	$3.98 \cdot 10^{-2}$
C	0-1	0.3	$3.89 \cdot 10^{-2}$
w_{bed}	10 m	1.5 m	$3.47 \cdot 10^{-2}$
H_S^g	0-900 W/m ²	20 W/m ²	$2.79 \cdot 10^{-2}$
k_b	0	0.2	$2.06 \cdot 10^{-2}$
$T_{sed,ini}$	9 °C	3 °C	$1.84 \cdot 10^{-2}$
RH	0-1	0.05	$1.52 \cdot 10^{-2}$
K	160 Wm ⁻² K ⁻¹	30 Wm ⁻² K ⁻¹	$1.45 \cdot 10^{-2}$
TA	6-28 °C	0.5 °C	$1.35 \cdot 10^{-2}$
f_s	0	0.1	$1.15 \cdot 10^{-2}$
p_1	13 W/m ² /mbar	3 W/m ² /mbar	$8.05 \cdot 10^{-3}$
B	0.65	0.045	$5.50 \cdot 10^{-3}$
ϕ	0.03	0.1	$4.79 \cdot 10^{-3}$
f_A	0	0.5	$4.77 \cdot 10^{-3}$
p_3	0.17 W/m ² /mbar/K	0.08 W/m ² /mbar/K	$3.64 \cdot 10^{-3}$
α	0.09	0.09	$3.42 \cdot 10^{-3}$
p	930-950 mbar	10 mbar	$3.19 \cdot 10^{-3}$
LA	46.4°	0.1 °	$2.93 \cdot 10^{-3}$
LO	7.8°	0.1 °	$2.79 \cdot 10^{-3}$
S_0	1.3%	0.3%	$1.88 \cdot 10^{-3}$
p_2	0.86 Ws/m ² /mbar/m	0.4 Ws/m ² /mbar/m	0
Wurzel der Quadratsumme			0.29

Tabelle B.4: Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei der Lonza im simulierten Streckenabschnitt Gampel-Rhône.

Anhang C

Wärmeverlust der Rhône durch die hydroelektrische Nutzung

Standort des Kraftwerk	mittlere Leistung im Sommer [MW]	mittlere Leistung im Winter [MW]
Altstafel	0.5	3.4
Moos, Münster	1.5	0.7
Reckingen	1.4	0.3
Rappental	0.5	0.1
Neubrigg	15.5	5.0
Fieschertal	28.5	2.5
Niederernen	26.2	15.8
Heiligkreuz, Laengtal	1.0	0.5
Heiligkreuz	11.0	1.9
Moerel	26.4	4.6
Moerel	43.7	18.1
Massaboden	5.2	3.4
Biel	109.7	3.4
Naters	0.3	0.2
Bortelalp	0.1	0.8
Alte Ganterbrücke/Berisal	2.7	1.8
Silliboden	5.0	3.8
Ried-Brig	0.3	0.2
Zermeiggen	11.7	19.3
Saas-Fee, Wichelti	0.1	0.0
Stalden	69.4	49.2
Zermatt	6.1	2.7
Zermatt, Alterhaupt	1.8	1.1
Zermatt, Wiesti	2.6	1.0

Standort des Kraftwerk	mittlere Leistung im Sommer [MW]	mittlere Leistung im Winter [MW]
Taesch	1.2	0.4
Riedji	0.3	0.3
Stalden, Ackersand	17.1	7.1
Stalden, Ackersand	29.1	11.7
Baltschieder	0.2	0.1
Unterbaech	0.7	0.5
Steg	61.9	11.9
Oberems	0.7	2.9
Unterems, Müllacheren	11.6	6.8
Dalaloch, Leuk-Stadt	3.6	2.5
Chippis	33.2	19.5
Lona, Val de Moiry	0.4	0.2
Motec	6.0	25.1
Vissoie	27.6	20.4
Vissoie	0.5	0.3
Chippis	34.8	31.8
Croix, La Giete Dele	10.5	22.9
Chamarin	0.1	0.0
St. Leonard, Magnol	8.0	11.0
En Beuyle	0.2	0.2
Sauterot	3.4	1.5
Bramois	15.8	6.7
Bramois	0.3	0.1
La Chandoline, Sion	9.1	17.2
La Chandoline, Sion	11.4	24.0
Ardon	31.2	5.7
Balavaud / Ardon	0.3	0.2
Bieudron / Nendaz	83.1	199.2
Fionnay	25.0	59.5
Bieudron	30.7	73.3
Mauvoisin	16.6	0.2
Fionnay	21.4	37.4
Riddes, Econe	54.2	97.1
Fully	2.7	2.7
Total	924.3	840.2

Tabelle C.1: Mittlere Produktionszahlen der Wasserkraftwerke mit einer Leistung von mindestens 300 kW im Einzugsgebiet der Rhône bis Martigny (Stand 1 Januar 02 [Eid02]).

Monat	Abfluss [m^3/s]	Temperatur- differenz [$^{\circ}C$]
Januar	67	3.0
Februar	71	2.8
März	70	2.9
April	77	2.9
Mai	136	1.6
Juni	243	0.9
Juli	273	0.8
August	246	0.9
September	166	1.3
Oktober	98	2.1
November	77	2.6
Dezember	67	3.0
Sommer April-September	191	1.2

Tabelle C.2: Mittlere Abflusswerte der BWG Station in Branson (Martigny) und die aus den Kraftwerksdaten berechneten mittleren Temperatursenkungen verursacht durch die Gewinnung elektrischer Energie, die als Reibungswärme nicht mehr zur Verfügung steht.

Tabellenverzeichnis

5.1	Abhängigkeit der Parameter von der Bewölkung (Original nach Brown und Barnwell [BB87]).	23
8.1	Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Blatten-Kippel.	64
8.2	Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Blatten-Kippel im Sommer 02.	66
8.3	Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Gampel-Rhône.	70
8.4	Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Gampel und der Mündung in die Rhône im Sommer 02.	71
8.5	Verwendete und berechnete Parameter bei den Tracerversuchen auf der Strecke zwischen Ferden und Gampel.	75
8.6	Hydraulische Parameter für die Simulation der Lonza im Flussabschnitt Ferden-Gampel.	76
8.7	Parameter für das Wärmehaushaltsmodell der Lonza im Flussabschnitt zwischen Riti und Gampel im Sommer 02.	77
8.8	Die Summen und die betragsmässig wichtigsten Parameter der Unsicherheitsanalyse der einzelnen Untersuchungsstrecken. Die Werte sind über die Zeit gemittelte und für die modellierten Temperaturwerte am Ende der Untersuchungsstrecken bestimmt. . .	79
A.1	Durchgeführte Abflussmessungen in der Lonza, flussabwärts aufgelistet.	99
A.2	Tracermessungen in der Borgne, flussabwärts aufgelistet.	100
A.3	Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne d’Arolla zwischen Arolla und Les Haudères.	100
A.4	Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne zwischen Les Haudères und dem Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne.	101
A.5	Aufnahmen (Temperatur und Bachbreite) in der Borgne zwischen Euseigne und Bramois.	101
B.1	Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei Kippel im simulierten Streckenabschnitt Blatten-Kippel.	102
B.2	Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei Greber im simulierten Streckenabschnitt Riti-Greber.	103

B.3	Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei der Lonza im simulierten Streckenab- schnitt Greber-Gampel.	104
B.4	Beiträge der verschiedenen Parameter an der Unsicherheit der Temperatursimulation bei der Lonza im simulierten Streckenab- schnitt Gampel-Rhône.	105
C.1	Mittlere Produktionszahlen der Wasserkraftwerke mit einer Lei- stung von mindestens 300 <i>kW</i> im Einzugsgebiet der Rhône bis Martigny (Stand 1 Januar 02 [Eid02]).	107
C.2	Mittlere Abflusswerte der BWG Station in Branson (Martigny) und die aus den Kraftwerksdaten berechneten mittleren Tem- peratursenkungen verursacht durch die Gewinnung elektrischer Energie, die als Reibungswärme nicht mehr zur Verfügung steht.	108

Abbildungsverzeichnis

3.1	Ausschnitt aus der Karte über die Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz [BWG01].	6
3.2	Kartenausschnitt des Lötschental aus der Schweizerischen Landeskarte.	8
3.3	Kartenausschnitt mit dem Fluss Borgne aus der Schweizerischen Landeskarte.	9
4.1	Foto einer Bachstrecke mit einer Totzone.	12
4.2	Trapezprofil	14
5.1	Energieflüsse, welche das Wärmeregime in Bergbächen bestimmen.	21
7.1	Schematische Abbildung mit den Temperaturmessstellen sowie Höhenprofi der Lonza vom Langgletscher bis zum Einfluss in die Rhône.	30
7.2	Foto der Lonza bei Kippel (Foto: 10.6.02 Werner Meier).	31
7.3	Foto der BWG Messstation in Blatten (Foto: 10.6.02 Werner Meier).	32
7.4	Foto der BWG Messstation in Blatten (Foto: 10.6.02 Werner Meier).	33
7.5	Abfluss- und Temperaturmessung der BWG-Station in Blatten im Sommer 2002 von Juni bis September (Quelle BWG).	34
7.6	Temperaturmessungen in Blatten und Kippel (linke Skala), sowie die Differenz (rechte Skala) im Sommer 2002.	34
7.7	Foto des Restwasserausfluss aus dem Stausee Ferden (Foto: 10.6.02 Werner Meier).	36
7.8	Der Zufluss, die genutzte Wassermenge und der Überlauf (inklusive Restwassermenge) des Stausees bei Ferden während dem Sommer 2002.	37
7.9	Fotos der Lonza auf der Restwasserstrecke zwischen Ferden und Gampel an verschiedenen Stellen (Fotos: 12.10.02).	37
7.10	Treppenartige Kühlrinne beim Ausfluss des Baustellenabwassers der Neat (Foto: 12.10.02).	38
7.11	Wassertemperatur in Greber, Abflussmenge aus dem Stausee in Ferden und die in Blatten gemessen Lufttemperatur im Sommer 02.	40
7.12	Gemessene Wassertemperaturen in der Lonza bei Riti, Greber und in Gampel vor der Wasserrückleitung des Kraftwerks im Sommer 02.	41

7.13	Zwei seitliche Zuflüsse der Lonza zwischen Greber und Gampel, links beim Bächigrabe, rechts beim innere Schwelliwald (Foto: 10.6.02).	42
7.14	Temperatur (linke Skala) und turbinierte Wassermenge (rechte Skala) beim Kraftwerk in Gampel-Steg im Sommer 2002.	44
7.15	Fotos des Kraftwerkausfluss in Gampel-Steg (rechts), zu einem Zeitpunkt als das Kraftwerk kein Wasser turbinierte. (Fotos: 12.10.02).	45
7.16	Gemessene Wassertemperatur des Restwassers, des Kraftwerkausflusses und der Mischung in der Lonza in Gampel im Sommer 02.	46
7.17	Schematische Abbildung mit den Temperaturmessstellen der Borgne.	47
7.18	Höhenprofil der Borgne von der Wasserfassung bei Arolla bis zur Mündung in die Rhône.	48
7.19	Borgne zwischen Arolla und les Haudères bei Pramousse (Foto: 16.10.02).	49
7.20	Ausschnitt aus den Temperaturmessungen in Arolla und in les Haudères in der Borgne d'Arolla im Sommer 2002.	50
7.21	Abgezweigte Wassermenge (Tagesmittelwerte) aus dem Stausee in La Lurette.	52
7.22	Wassertemperatur der Borgne, der Borgne d'Arolla und der Borgne de Ferpècle in les Haudères im Sommer 02.	53
7.23	Wassertemperatur in der Borgne bei Les Haudères und unterhalb von Euseigne kurz vor dem Zufluss der Dixence während des Sommers 02.	54
7.24	Borgne vor (links) und nach (rechts) der Stauung in La Lurette (Foto: 16.10.02).	55
7.25	Borgne zwischen Euseigne und Bramois (Foto: 8.10.02).	56
7.26	Wassertemperatur in der Borgne vor und nach (Mischtemperatur) dem Zufluss der Dixence unterhalb von Euseigne im Sommer 02.	57
7.27	Wassereinleitung beim Kraftwerk in Bramois (Foto: 9.10.02).	58
7.28	Mittlerer Tagesabfluss des Kraftwerks Bramois während des Sommers 02.	58
7.29	Wassertemperatur der Borgne in Euseigne und in Bramois vor der Mündung in die Rhône und die mittlere tägliche Einleitung des Kraftwerkes in Bramois im Sommer 02.	59
7.30	Wassertemperatur der Einleitung des Kraftwerks Chandoline während des Sommers 02. Die erhöhten Werte sind Aufzeichnungen während Zeitpunkten in welchen das Kraftwerk kein Wasser turbinierte und der Logger deshalb die Temperatur des stehenden Wasser oder der Luft aufzeichnete.	60
8.1	Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Kippel.	64
8.2	Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Kippel, Starttemperatur in Blatten, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.	67

8.3	Die im Modell berechneten Energieflüsse der Lonza im Flussabschnitt von Blatten nach Kippel im Sommer 02 (aufgezeichnet für den Standort Kippel).	68
8.4	Die simulierte und die gemessene Wassertemperatur in der Lonza bei der Mündung in die Rhône im Sommer 02.	72
8.5	Die im Modell berechneten Energieflüsse der Lonza im Flussabschnitt von Gampel bis zur Mündung in die Rhône im Sommer 02 (aufgezeichnet bei der Mündung).	73
8.6	Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Gampel.	74
8.7	Simulierte und gemessene Salzkonzentration beim Tracerversuch in Greber.	75
8.8	Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Greber, Starttemperatur in Riti, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.	78
8.9	Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Gampel, Starttemperatur in Greber, sowie die Differenz zwischen den simulierten und den gemessenen Werten während des Sommers 02.	79
8.10	Die im Modell berechneten Energieflüsse in der Restwasserstrecke berechnet in Goppenstein im Sommer 02.	80
8.11	Die simulierte und die gemessene Wassertemperatur, sowie der Abfluss während der Überlaufphase in der Lonza bei Riti im Sommer 02.	82
9.1	Prognostizierte Abflussmenge der Lonza für den Wasserabfluss mit und ohne Wassernutzung für den Sommer 02.	85
9.2	Simulierte Wassertemperatur für den aktuellen und den hypothetischen unbeeinflussten Abfluss der Lonza in Gampel, Starttemperatur in Kippel, sowie die Temperaturdifferenz zwischen dem beeinflussten und dem unbeeinflussten Zustand während der untersuchten Zeitperiode im Sommer 02.	86
9.3	Simulierte Energieflüsse für die Konvektion (oberstes Kurvenpaar), die Evaporation (Mitte) und die langwellige Ausstrahlung (unteres Kurvenpaar) jeweils für den unbeeinflussten Fluss (grüne Kurven) und den Restwasserabfluss (rote Kurve) für die Lonza 1 km vor Gampel. Die blaue Kurve entspricht der Energiedifferenz aller Energieflüsse zwischen dem unbeeinflussten und dem Restwasserabfluss.	87
9.4	Simulierte Wassertemperatur für den aktuellen und den hypothetischen unbeeinflussten Abfluss der Lonza, sowie die Temperaturdifferenz zwischen dem turbinieren und dem unbeeinflussten Abfluss vor der Mündung in die Rhône während der untersuchten Zeitperiode im Sommer 02.	88
9.5	Prognostizierte Abflussmenge für den Wasserabfluss der Lonza vor der Mündung in die Rhône mit und ohne Wassernutzung für den Sommer 02.	89