



EAWAG

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz
6047 Kastanienbaum

**Lorenz Moosmann, Martin Schmid
und Alfred Wüest**

Januar 2005

Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe

Kurzfassung

Die Orbe ist in ihrem Oberlauf in der Vallée de Joux kaum beschattet und weist deshalb im Sommer hohe Wassertemperaturen auf. Diese liegen für viele Fischarten, insbesondere für die Äsche, weit über den optimalen Werten.

Mit Hilfe eines numerischen Modells wurde bestimmt, wie sich die Wassertemperatur in der Orbe ändert, wenn der Fluss an einzelnen Stellen beschattet wird. Dazu wurden Temperaturmessungen, Abflussdaten der Orbe sowie meteorologische Daten herangezogen.

Die Modellrechnungen zeigen, dass durch eine Beschattung von mehreren 100 m Länge die Wassertemperatur um mehrere °C reduziert werden kann: z. B. auf einer 400 m langen Strecke um bis zu 4 °C. Bei geringem Abfluss nähert sich die Wassertemperatur unterhalb der beschatteten Strecke wiederum rasch den ursprünglich hohen Werten.

Zur Auswahl der Strecken, welche sich für eine Beschattung eignen, können die folgenden Kriterien herangezogen werden: Geringe Fließgeschwindigkeit, Ausrichtung von West nach Ost, hohe Wassertemperatur, geringer Bewuchs von Wasserpflanzen, und aus fischökologischer Sicht wertvolle Strecken. Wird eine Strecke beschattet, so kann der tatsächliche Effekt durch Temperaturmessungen sowie durch Befischungen einfach überprüft werden.

Inhalt

1. Einführung.....	5
2. Methoden	7
2.1. Bedeutung der Wassertemperatur	7
2.2. Temperaturregime von Flüssen.....	8
2.3. Modellierung	9
3. Temperaturmessreihen	10
4. Modellrechnungen.....	13
4.1. Verwendete Eingabedaten	13
4.2. Eichung des Modells	14
4.3. Szenarien mit Beschattung.....	16
4.4. Einfluss von Wasserentnahmen	22
5. Schlussfolgerungen.....	24
Quellenangaben	25
Anhang.....	26
Daten zu den Flussabschnitten	26
Eingabedaten / im Modell verwendete Variablen	26

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Wasser und Geologie und beim Service des eaux, sols et assainissements du Canton de Vaud (SESA) für die zur Verfügung gestellten Abflussdaten, beim Service des forêts, de la faune et de la nature du Canton de Vaud für Daten zu den Flussabschnitten und bei der MeteoSchweiz für den Zugang zu den Meteodaten. Armin Peter und Martin Frey gaben wertvolle Hinweise zum Schlussbericht. Michael Schurter danken wir für die Unterstützung bei den Temperaturmessungen.

1. Einführung

Der Oberlauf der Orbe liegt in der Vallée de Joux auf einer Höhe von rund 1000 m. Die ca. 15 km lange Strecke von der französischen Grenze bis zum Lac de Joux führt durch Weideland und besitzt fast keine Beschattung. Durch die direkte Sonneneinstrahlung erwärmt sich das Wasser im Sommer auf Temperaturen von über 25 °C.

Diese Temperaturen sind für viele Fischarten zu hoch. Insbesondere für die Äsche (*Thymallus thymallus*) beginnt bereits bei 19 °C der Stressbereich (Elliott, 1981), und Temperaturen über 23 °C führen zu erhöhter Mortalität (Persat, 1988). Auch für weitere in der Orbe vorkommende Fische liegen diese Temperaturen über den optimalen Werten (Tabelle 1).

Aus seinen ausführlichen Untersuchungen zur Biologie und Ökologie der Äsche in der Orbe schloss Paquet (2002), dass die Wassertemperatur einen entscheidenden Faktor für den Erhalt der Äschenpopulation darstellt. Eine Möglichkeit, um hohe Wassertemperaturen zu vermeiden, ist das Pflanzen von Bäumen und Sträuchern entlang des Flusses. Die direkte Sonneneinstrahlung, der grösste Beitrag zur Erwärmung des Wassers, kann dadurch abgeschirmt werden.

Inwiefern eine Beschattung die hohen Temperaturen in der Orbe verhindern kann, soll in der vorliegenden Studie geklärt werden. Das „Service des forêts, de la faune et de la nature du Canton de Vaud“ (SFFN) beauftragte die EAWAG, den Einfluss einer Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe zu quantifizieren.

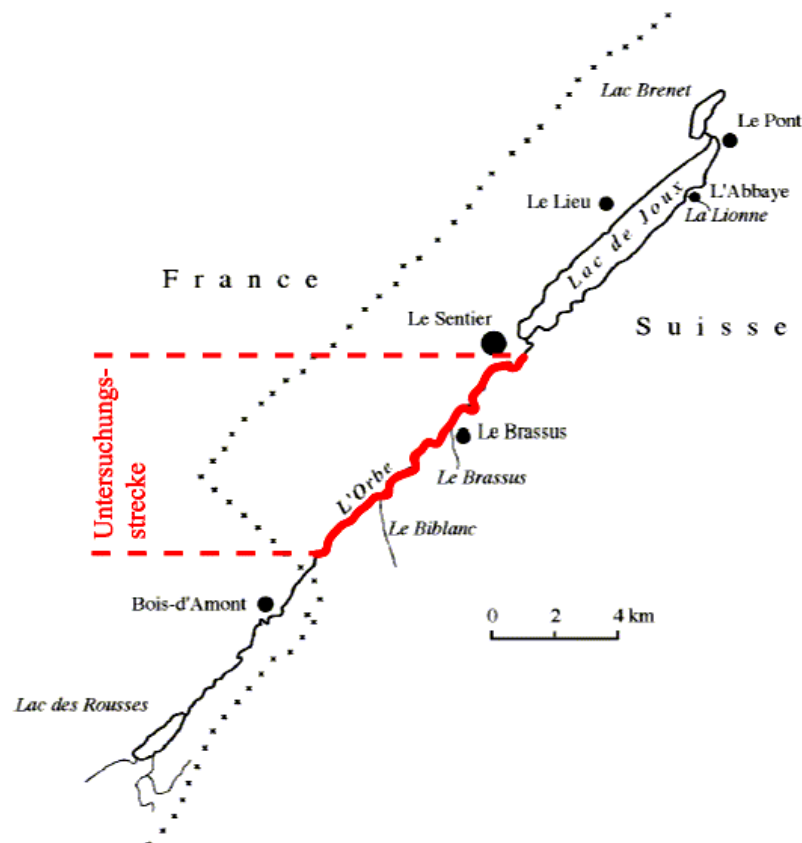


Abbildung 1: Übersichtskarte Vallée de Joux mit der Untersuchungsstrecke (nach Paquet, 2002).

Dieser Einfluss auf die Temperatur wird mit Hilfe eines Computermodells bestimmt. Bei der Modellierung wird der 15 km lange Flussabschnitt zwischen der französischen Grenze und Le Sentier am Lac de Joux berücksichtigt (Abbildung 1). Ausgehend von Temperaturmessungen entlang des Flusslaufs wird der Wärmehaushalt der Orbe im Modell abgebildet und anschliessend wird bestimmt, wie sich die Wassertemperatur verändert, wenn verschiedene Abschnitte beschattet werden. Ausserdem wird ein möglicher Einfluss von Wasserentnahmen auf den Temperaturhaushalt diskutiert.

Der Bericht ist folgendermassen aufgebaut: In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Temperaturregimes erläutert, und es wird gezeigt, wie sich darauf ein Computermodell aufbauen lässt. In Kapitel 3 werden die im Rahmen dieser Arbeit im Sommer 2004 durchgeführten Temperaturmessungen dargestellt. In Kapitel 4 werden verschiedene Szenarien mit Beschattung behandelt und mit Hilfe des Computermodells ihre Auswirkungen auf die Wassertemperatur bestimmt. In Kapitel 5 werden die Schlussfolgerungen zusammengefasst.

2. Methoden

2.1. Bedeutung der Wassertemperatur

Die Wassertemperatur stellt einen bedeutenden Faktor für das Überleben der aquatischen Biota (Flora und Fauna) von Flüssen und Bächen dar. Sie beeinflusst den Stoffwechsel, die Atmung und die Toleranz von Tieren und Pflanzen gegenüber Parasiten und bestimmt physikalische und chemische Eigenschaften des Wassers wie etwa die Löslichkeit von Gasen.

Ungünstige Temperaturbedingungen haben vielfältige negative Auswirkungen auf die aquatische Fauna. Hinsichtlich der Orbe sind vor allem die Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf die Fische von Interesse. Hohe Wassertemperaturen führen zu gesteigerter Aktivität der Fische: Ab einer gewissen Temperatur arbeitet der Stoffwechsel so schnell, dass die Fische nicht mehr genügend Nahrung finden können. Bei noch höheren Temperaturen tritt innerhalb kurzer Zeit der Tod ein (Küttel et al., 2002).

Tabelle 1: Temperaturoptima und -extremwerte (°C) für wichtige in der Orbe vorkommende Fischarten (Küttel et al., 2002). Es handelt sich um Literaturwerte; Anpassungseffekte sind nicht berücksichtigt.

		Äsche (<i>Thymallus thymallus</i>)	Bachforelle (<i>Salmo trutta</i>)	Hecht (<i>Esox lucius</i>)	Alet (<i>Leuciscus cephalus</i>)	Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)
Eier	Maximum	16	14	25	30	16
	Oberes Optimum	14	9	15	24	16
	Unteres Optimum	7	1	8	16	6
	Minimum	0	0	2	16	6
Juvenile	Maximum		28	33		23
	Oberes Optimum		14	26		
	Unteres Optimum		7	7		
	Minimum		0	3		
Adulte	Maximum	26	30	34	39	31
	Oberes Optimum	18	19	25	25	25
	Unteres Optimum	4	4	9	8	13
	Minimum	0	0	9	8	0
Fortpflanzung	Maximum	15	13	23	18	22
	Oberes Optimum	10	10	10	18	22
	Unteres Optimum	6	1	5	13	11
	Minimum	4	1	0	13	7

2.2. Temperaturregime von Flüssen

Die Wassertemperatur in Fließgewässern wird durch Austauschprozesse mit der Umgebung (Sonneneinstrahlung, Austausch mit der Atmosphäre und dem Sediment) beeinflusst. Das Gewässer nimmt einerseits Wärme auf, gibt diese aber auch wieder an die Umgebung ab. In der Schweiz nimmt die Wassertemperatur im Sommer von der Quelle flussabwärts meistens zu (Ausnahme heisse Quellen). Im Winter kann es je nach klimatischen Bedingungen und Flussgeometrie im Flussverlauf zu einer Temperaturabnahme kommen.

Die wichtigsten natürlichen Energieflüsse, welche die Wassertemperatur in Fließgewässern steuern, sind die kurzwellige Sonneneinstrahlung, die langwellige Ein- und Ausstrahlung, der Wärmeaustausch mit dem Sediment, Verdunstung/Kondensation, Wärmeleitung (Konvektion) und die Erwärmung durch die Reibung. Alle diese Prozesse werden im Temperaturmodell berücksichtigt.

Einen geringen Einfluss auf die Wassertemperatur haben auch Niederschlagsereignisse. Die Daten zur genauen Bestimmung des Energiebeitrags durch Niederschläge sind jedoch meistens nicht vorhanden. Wenn in der untersuchten Periode keine grösseren Niederschlagsereignisse stattfinden, kann dieser Prozess vernachlässigt werden. Schliesslich können auch chemische und biologische Prozesse zu einer gewissen Erwärmung des Wassers führen. Diese ist jedoch um Größenordnungen kleiner als zum Beispiel jene aufgrund der Sonneneinstrahlung, so dass diese Prozesse hier nicht berücksichtigt werden.

Die berücksichtigten Prozesse sind in der Abbildung 2 schematisch dargestellt. Ausführliche mathematische Beschreibungen der Prozesse sind in den Arbeiten von Meier (2002, 2003) oder Frey (2003) zu finden.

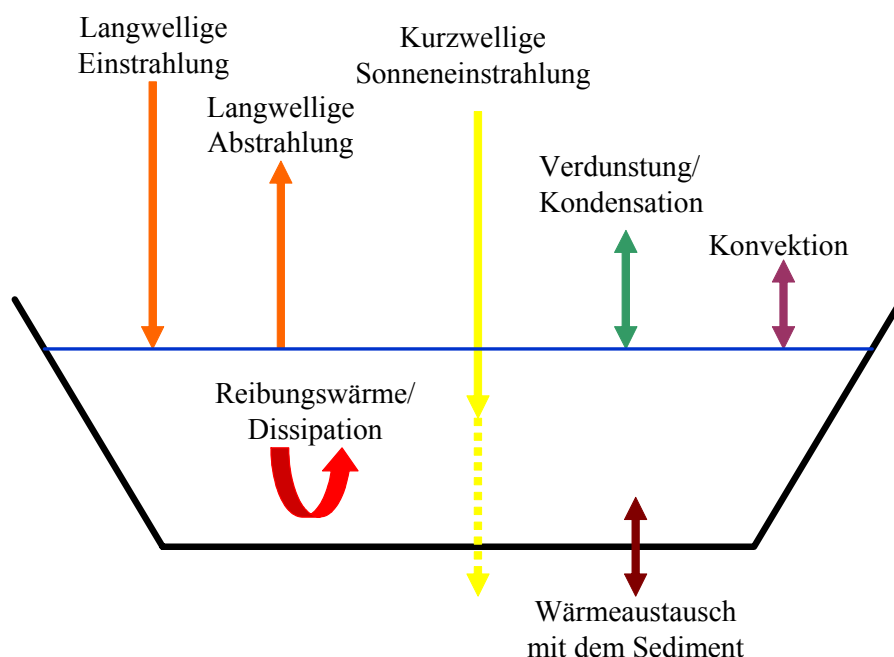


Abbildung 2: Energieflüsse, welche den Wärmehaushalt in Fließgewässern bestimmen (Frey, 2003).

Die Energieaustauschprozesse zwischen dem Wasser und der Umgebung finden über die Wasseroberfläche, respektive das Gewässerbett (Wärmeaustausch mit dem Sediment) statt. Einzig die Reibungswärme wird ausschliesslich vom Gefälle bestimmt. Der Energieaustausch mit dem Sediment ist über längere Zeit betrachtet meist nahezu ausgeglichen (Wärmeaufnahme in der Nacht und im Winter, Wärmeabgabe während dem Tag und im Sommer).

Wie stark sich die Energieflüsse auf die Temperatur des Flusses auswirken, hängt vor allem von der Wassertiefe und somit vom Abfluss ab. Bei geringem Abfluss nimmt das zu erwärmende Volumen ab, die Wasseroberfläche ändert sich aber je nach Form des Bachbetts meist nur wenig. Die Energieflüsse bleiben deshalb in etwa gleich, wirken aber auf ein geringeres Volumen. Dies führt zu einer schnelleren Anpassung an die Umgebungsbedingungen; d.h. zu einer rascheren Erwärmung am Tag bzw. Abkühlung in der Nacht.

Neben den natürlichen Prozessen können auch künstliche Einflüsse die Wassertemperatur verändern, wie z. B. Wasserentnahmen, Kläranlagen oder Kühlwassereinleitungen. Im Fall der Orbe stellt das Fehlen der Ufervegetation die grösste anthropogene Veränderung dar. Im ursprünglichen Zustand waren die Ufer der Orbe zumindest teilweise bewachsen, wodurch ein Teil der Sonneneinstrahlung abgeschirmt wurde. Heute erreicht praktisch die gesamte Sonneneinstrahlung den Fluss, was zu einer starken Erwärmung führt.

2.3. Modellierung

Um den Wärmehaushalt der Orbe nachzubilden, wird zunächst ein hydraulisches Modell des Flusses erstellt, um damit die Abflussbedingungen zu simulieren. Mit dem hydraulischen Modell werden aus den gegebenen Randbedingungen (Gerinnegeometrie, Reibungs- und Dispersionskoeffizienten und Zuflüsse) der Abfluss, die Fliessgeschwindigkeit und die Wassertiefe entlang der Untersuchungsstrecke berechnet. Anschliessend werden die Energieflüsse zwischen dem Wasser und der Umgebung nachgebildet und daraus die Wassertemperatur berechnet.

Die Modellrechnungen werden mit dem Computerprogramm AQUASIM 2.1 durchgeführt. Mit diesem Modell werden die Flusseigenschaften über den Querschnitt des Flusses gemittelt. Dieses eindimensionale Modell eignet sich, um Austauschprozesse über längere Strecken zu simulieren. Aussagen zur Temperaturverteilung über den Längsverlauf, nicht aber über den Querschnitt, sind damit möglich.

3. Temperaturmessreihen

Im folgenden Kapitel werden die im Sommer 2004 an verschiedenen Stellen in der Orbe gemessenen Wassertemperaturen dargestellt und die Auswirkungen auf das Temperaturregime erläutert.

Vom 18. Mai bis 5. November 2004 wurde die Wassertemperatur an 8 Stellen in der Orbe sowie an einer Stelle im Zufluss Le Brassus gemessen. Dazu wurden Temperatursensoren der Marke VEMCO ins Wasser eingesetzt, welche alle 30 Minuten die gemessene Temperatur aufzeichneten. Die Temperatur des zweiten grösseren Zuflusses, Le Biblanc, wurde nicht gemessen, da er im Sommer 2004 vor dem Eintritt in die Orbe versickerte. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die Messstellen.

In Abbildung 4 ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Temperaturen während der heisssten Periode im Juli 2004 dargestellt. Es sind typische Tagesverläufe mit minimalen Temperaturen am Vormittag und maximalen Temperaturen am späten Nachmittag zu sehen. Der Zufluss Le Brassus (Messstation 6) entspringt in einem Nordhang wenige Kilometer von der Messstelle entfernt und erwärmt sich auf dieser Strecke nur wenig (gelbe Kurve in Abbildung 4).

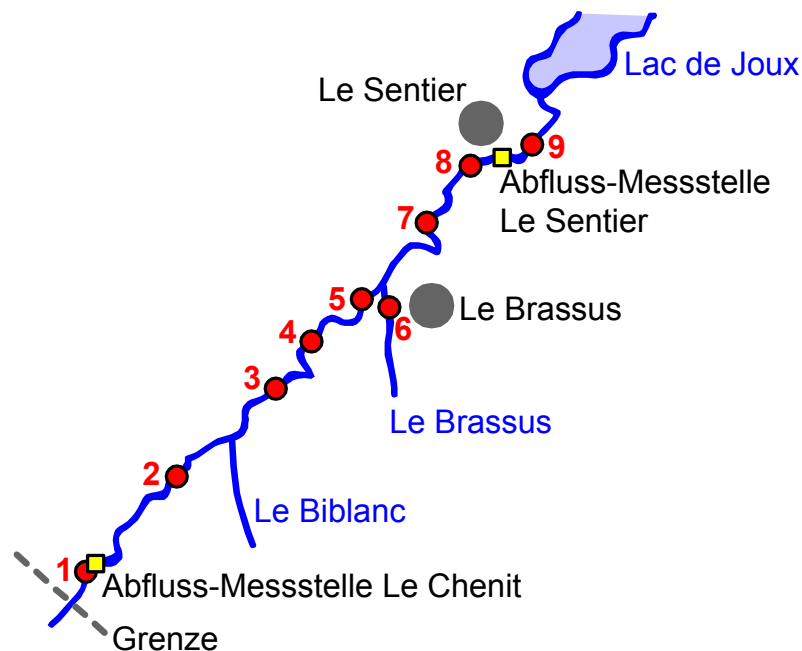


Abbildung 3: Übersichtskarte des untersuchten Abschnitts. Die nummerierten Punkte stellen die Temperatur-Messstellen dar.

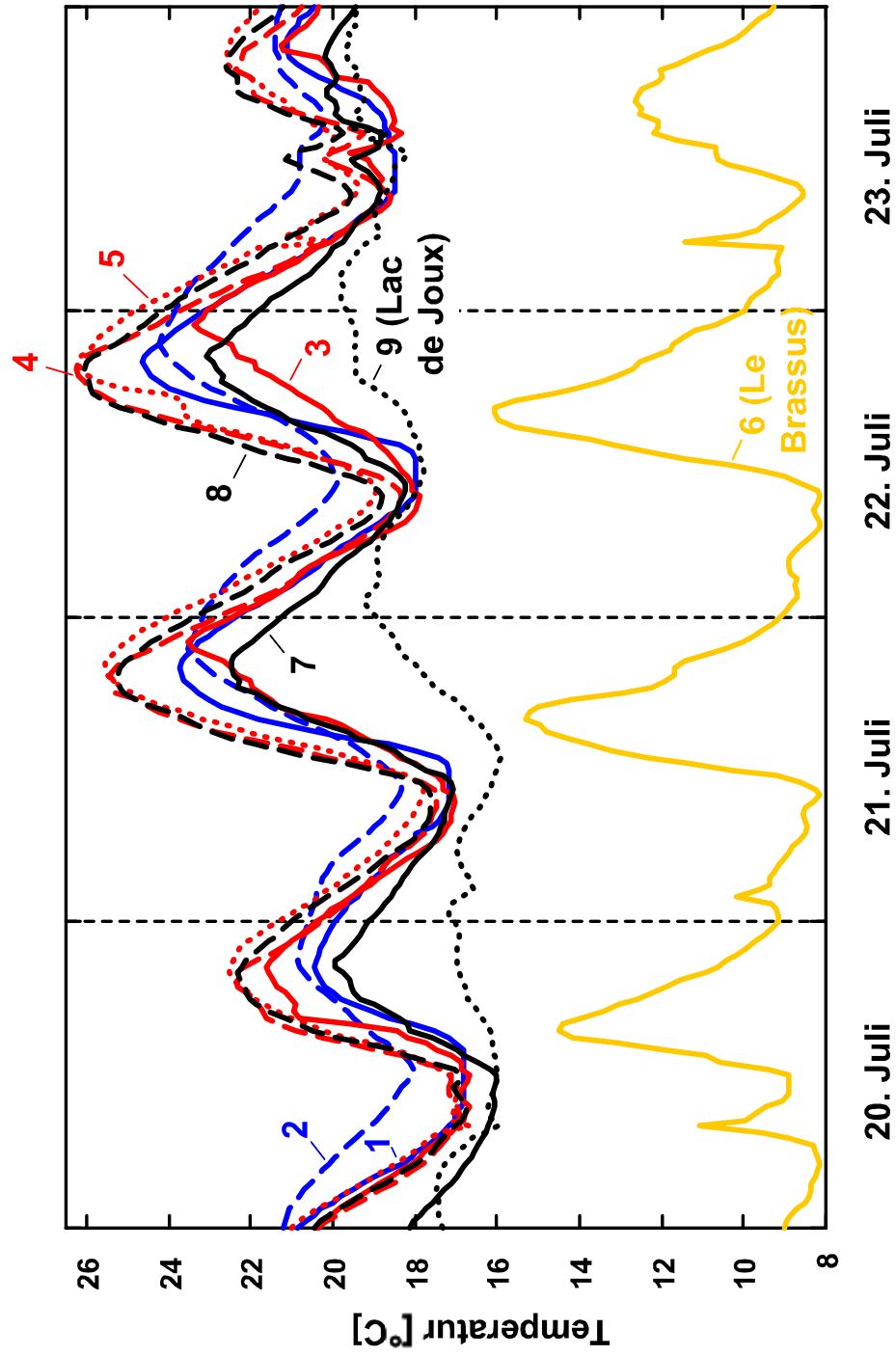


Abbildung 4: Tagesgang der Temperaturen vom 20. bis 23. Juli 2004 (wärmste Periode des Jahres 2004). Die Nummern entsprechen den Messstellen in Abbildung 3.

Am 22. Juli wurden an mehreren Stellen Temperaturen um 26 °C gemessen. Die Messstellen 3 und 7 verzeichneten geringere Temperaturen, da sie sich unterhalb der kühlen Zuflüsse Le Biblanc und Le Brassus (siehe Messstelle 6) befanden. Die Messstelle 9 befindet sich kurz vor der Einmündung der Orbe in den Lac de Joux. Dort macht sich bereits die Dichteschichtung des Sees bemerkbar, d. h. Oberflächen- und Tiefenwasser vermischen sich im Bachbett nicht mehr und am Grund des Bachbetts, wo sich der Temperatursensor befand, wurden niedrigere Temperaturen gemessen.

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Temperaturen im Lauf des Sommers. Es ist zu sehen, dass Tagesmaxima am Ende der Strecke (Station 8) in einigen Fällen unter den Temperaturen zu Beginn (Station 1) liegen. Dies ist wiederum auf die kälteren Zuflüsse (Le Biblanc und Le Brassus) zurückzuführen.

Über einen Zeitraum von vier Wochen von Juli bis August wurden täglich Maxima von über 20 °C erreicht. Der Temperaturverlauf im Sommer des Jahres 2004 ist vergleichbar mit jenen der Jahre 1996 bis 1998, welche von Paquet (2002) gemessen wurden.

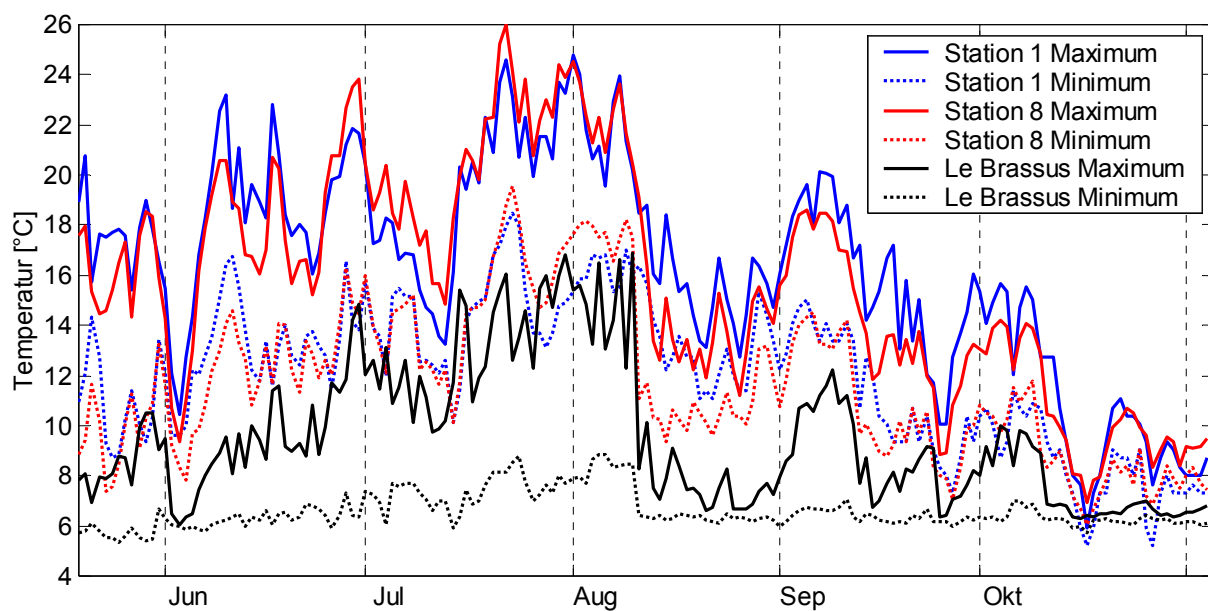


Abbildung 5: Gemessene Temperaturen an Station 1 (Frontière) und Station 8 (Le Sentier) sowie im Zufluss Le Brassus, von Mitte Mai bis Anfang November 2004. Es sind Tagesmaxima und -minima dargestellt.

4. Modellrechnungen

4.1. Verwendete Eingabedaten

Für das Modell wurde die Orbe in 20 homogene Abschnitte von 400 bis 1300 m Länge eingeteilt. Für jeden dieser Abschnitte sind Gefälle und Breite bekannt (Daten des SFFN). Das Flussbett ist annähernd kanalförmig, deshalb wurde die Breite unabhängig vom Abfluss als konstant angenommen.

Ausserdem lagen Messungen der Fliessgeschwindigkeiten und der Wassertiefen bei gemessenem Abfluss vor. Diese Daten wurden verwendet, um den Reibungswiderstand zu bestimmen. Dazu wurde das Abflussmodell mit dem gemessenen Abfluss mehrmals durchlaufen und der Reibungskoeffizient variiert, bis modellierte Tiefe und Fliessgeschwindigkeit mit den gemessenen Werten bestmöglich übereinstimmten.

Abflüsse werden in der Orbe nahe der französischen Grenze am Pont de Carre (Messstation „Le Chenit“ des Bundesamts für Wasser und Geologie BWG) und in Le Brassus (Messstation der SESA) gemessen. Für die beiden Zuflüsse Le Biblanc und Le Brassus sind keine Abflussmessungen vorhanden. Deren Abfluss wurden folgendermassen abgeschätzt: Es wurde jeweils die Differenz im Abfluss zwischen Le Brassus und Pont de Carre bestimmt und im Verhältnis 1:2 auf Le Biblanc und Le Brassus aufgeteilt. Dieses Verhältnis wurde aufgrund der Temperaturmessung oberhalb und unterhalb der Zuflüsse bestimmt – die Temperaturänderung durch den Brassus ist etwa doppelt so gross wie jene durch den Biblanc.

Mit diesen Eingabedaten konnte das Abflussmodell realisiert werden. Dieses berechnet für einen gegebenen Abfluss an jeder Stelle entlang des Flusses die Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe.

Aufbauend auf dem Abflussmodell folgt das Wärmehaushaltsmodell, welches den Wärmeaustausch berücksichtigt und als wichtigstes Resultat die Wassertemperatur liefert. Für das Wärmeaustauschmodell wurden die folgenden Eingabedaten verwendet:

Wassertemperaturen: Eingangsdaten sind die gemessenen Wassertemperaturen am Beginn der Strecke sowie die Wassertemperatur der beiden Zuflüsse. Die Temperaturen zu Beginn der Strecke (Pont de Carre, Messstation 1) und im Brassus (Messstation 6) wurden von der EAWAG direkt gemessen (siehe Kapitel 3). Der Biblanc versickerte im Sommer 2004 oberhalb des Eintritts in die Orbe, deshalb konnte dessen Temperatur nicht gemessen werden. Die niedrigeren Temperaturen in der weiter unten gelegenen Messstation 3 (siehe) deuten aber darauf hin, dass kühles Wasser aus dem Biblanc bzw. aus dem Grundwasser in diesem Bereich in die Orbe gelangt. Da der Biblanc eine ähnliche Exposition wie der Brassus aufweist, wurde dieselbe Temperatur wie beim Brassus angenommen.

Lufttemperatur: Es wurden Lufttemperaturmessungen der Meteostation La Dôle verwendet. Da diese jedoch 650 m höher und 20 km entfernt liegt, können diese Daten nicht direkt übertragen werden. Bis 1991 wurde eine Meteostation in Le Brassus betrieben. Durch den Vergleich der historischen Daten von Le Brassus mit jenen von La Dôle wurde eine Korrektur bestimmt (Details siehe Anhang). Die korrigierte Temperatur ist im Durchschnitt um rund 2 °C höher als jene von La Dole.

Sonneneinstrahlung: Es werden ebenfalls die Daten von La Dôle verwendet, korrigiert aufgrund des Vergleichs mit historischen Daten von Le Brassus. Die korrigierte Globalstrahlung beträgt rund 85% der Globalstrahlung in La Dôle. Dies kann durch den Höhenunterschied und Unterschiede in der Bewölkung erklärt werden. Es besteht aber eine Unsicherheit, da die Bewölkung in der Vallée de Joux sehr verschieden von jener im 20 km entfernten La Dôle sein kann. Für die Fragestellung interessieren aber vor allem klare Sommertage, an denen die regionalen Unterschiede gering sind.

In ähnlicher Weise wurden relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit von der Station La Dôle übernommen und korrigiert (siehe Anhang). Diese Daten sind für den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre von Bedeutung.

Gewisse flussspezifische Eigenschaften, die für den Wärmehaushalt eine Rolle spielen, lassen sich im Feld nur schwer oder gar nicht bestimmen. Diese Werte können abgeschätzt werden, indem man die am Ende der Strecke gemessenen Temperaturen mit den modellierten Temperaturen vergleicht und die Abweichung minimiert. Bei den Modellierungen in der Orbe wurden die Wärmeleitung des Sediments, die Wärmekapazität des Sediments und der Anteil der kurzwelligigen Strahlung, welcher ins Sediment gelangt, durch eine solche Parameterschätzung abgeschätzt.

Genauere Angaben zum Vorgehen bei der Modellierung sind in der Literatur zu finden (Meier, 2002; Frey, 2003).

4.2. Eichung des Modells

Das Modell wurde auf zwei typische Phasen im Sommer 2004 angewendet: Auf den Zeitraum vom 28. Juni bis zum 1. Juli (hohe Wassertemperaturen bei noch relativ hohem Abfluss, ca. 120 L/s) sowie vom 20. bis 23. Juli (Zeitraum der höchsten Wassertemperaturen

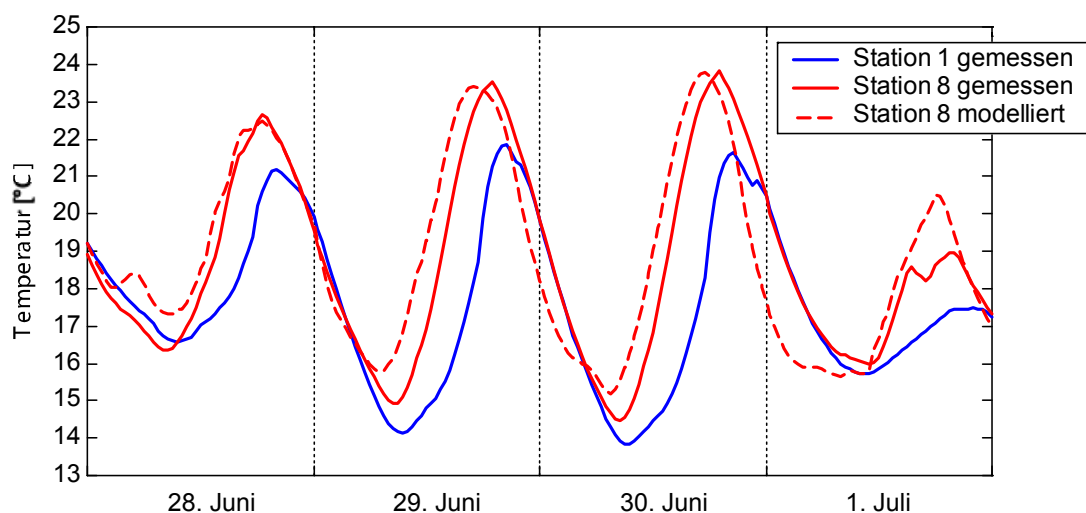


Abbildung 6: Gemessene Wassertemperatur zu Beginn der Strecke (Station 1), gemessene Wassertemperatur am Ende der Strecke (Station 8), sowie modellierte Wassertemperatur, 28. Juni bis 1. Juli 2004.

bei niedrigem Abfluss, ca. 40 L/s). Für diese Zeiträume wurden die Modellparameter so bestimmt, dass die modellierte Temperatur am Ende der Strecke möglichst gut mit der gemessenen Temperatur (Station 8) übereinstimmt. Abbildung 6 zeigt, dass der modellierte Temperaturverlauf dem gemessenen folgt, die Maxima aber früher erreicht werden, und dass die Temperaturminima und die Temperatur am 1. Juli (Tag mit geringer Sonneneinstrahlung) überschätzt werden.

Neben den Temperaturen werden auch die einzelnen Energieflüsse vom Programm Aquasim berechnet. Abbildung 7 zeigt, dass sich die langwellige Einstrahlung und langwellige Abstrahlung in etwa die Waage halten, und dass die Solarstrahlung während des Tages den bedeutendsten Energiefluss darstellt. Am ersten und letzten Tag war die Solarstrahlung aufgrund von Bewölkung geringer. Ausserdem spielt der Wärmeaustausch mit dem Sediment eine Rolle: Während der Nacht und am Vormittag, wenn die Wassertemperatur relativ gering ist, kommt es zu einem Wärmefluss aus dem Sediment in die Orbe. Der Austausch mit dem Sediment wurde durch eine Parameterschätzung bestimmt und konnte nicht durch Messungen überprüft werden. Zur Zeit der höchsten Wassertemperaturen ist – zumindest während des Tages – ein Energiefluss vom Wasser ins Sediment zu erwarten. Die korrekten Werte für den Sedimentaustausch sollten deshalb weiter in den negativen Bereich verschoben sein, als dies in Abbildung 7 (schwarze Kurve) der Fall ist.

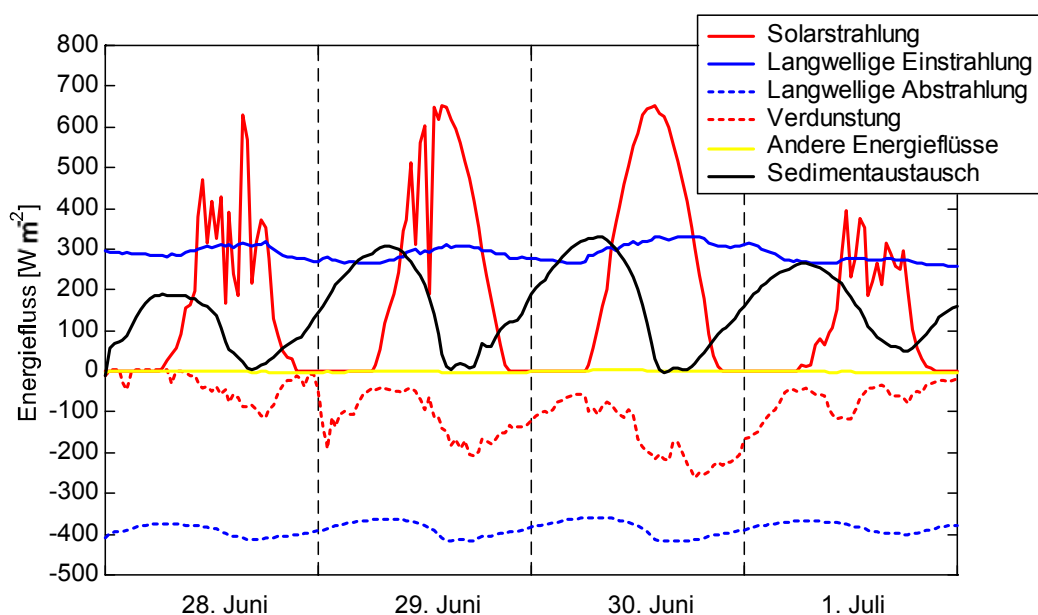


Abbildung 7: Modellierter Energieflüsse, 28. Juni bis 1. Juli 2004, auf Höhe der Messstelle 8.

4.3. Szenarien mit Beschattung

Nach der Anpassung des Modells an den Ist-Zustand der Orbe wurden in einem nächsten Schritt verschiedene Beschattungsszenarien berechnet. Die Beschattung wurde modelliert, indem über einzelne Flussabschnitte hinweg die Solarstrahlung reduziert wurde.

Eine Beschattung ist am effektivsten, wenn die folgenden Punkte erfüllt sind:

- Die beschatteten Strecken sollen in etwa von West nach Ost verlaufen, damit eine Bestockung auf der Südseite die Sonneneinstrahlung um die Mittagszeit abhält.
- Es sollen Strecken gewählt werden, in denen das Wasser langsam fließt. Dadurch verbleibt es über einen längeren Zeitraum im Schatten.
- Es sind jene Strecken zu beschatten, in denen hohe Temperaturen auftreten, also nicht direkt unterhalb eines kühlen Zuflusses.

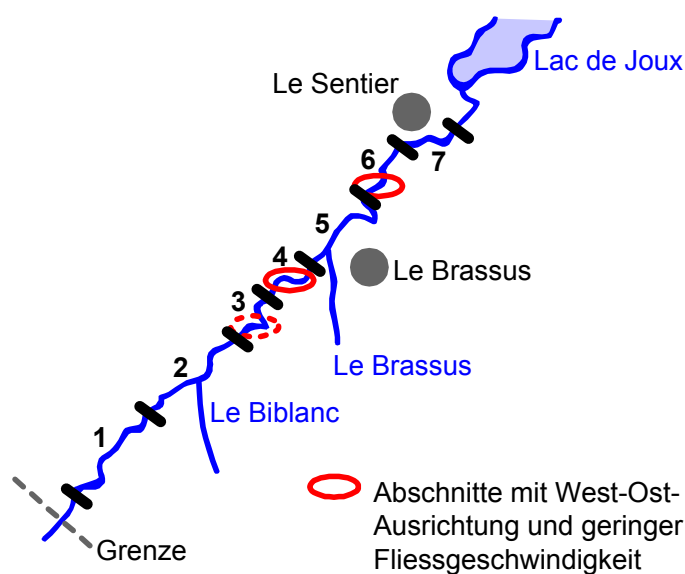
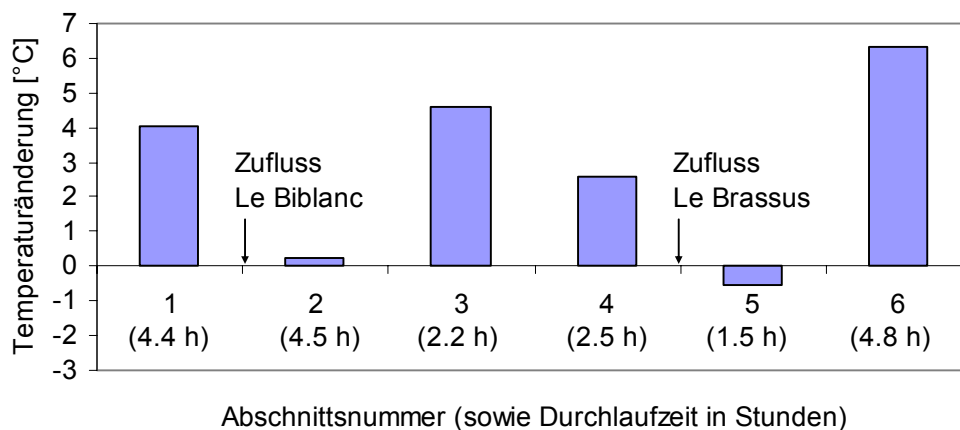


Abbildung 8: Oben: Temperaturänderung zwischen je zwei Messstationen um die Mittagszeit, 23. Juli 2004. Unten: Karte mit Nummerierung der gezeigten Abschnitte.

Abbildung 8 zeigt die Temperaturänderung in den einzelnen Strecken um die Mittagszeit am 23. Juli 2004. Dazu wurde die Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Messstellen bestimmt, wobei die Fliesszeit berücksichtigt wurde: In Abschnitt 1 z. B. benötigt das Wasser bei einer Fliessgeschwindigkeit von rund 20 cm/s eine Zeit von ca. 4 Stunden zum Durchfliessen der Strecke. Es wurde deshalb die Temperatur zu Beginn der Strecke um 11:30 Uhr und am Ende der Strecke um 15:30 Uhr verglichen (der Sonnenhöchststand ist um ca. 13:30 Sommerzeit). Während das Wasser von Messstation 1 zu Messstation 2 fliesst, erwärmt es sich um ca. 4 °C. Zwischen Station 2 und 3 erwärmt es sich nur wenig, da kühles Wasser aus dem Biblanc bzw. aus dem Grundwasser eintritt. Ein ähnlicher Fall tritt unterhalb der Einmündung des Brassus auf. Die grösste Erwärmung wurde auf dem Abschnitt bei Le Sentier (zwischen Messstation 7 bis 8) gemessen.

Strecken, welche die oben genannten Bedingungen erfüllen, sind Flusskilometer 6.5 bis 7, 8 bis 8.5 und 11 bis 11.5 (diese Strecken sind rot markiert in Abbildung 8, unten). Die erste der drei ausgewählten Strecken weist allerdings weniger hohe Temperaturen und eine grössere Fliessgeschwindigkeit auf und ist deshalb weniger relevant als die beiden folgenden Strecken. Neben den in Abbildung 8 eingezeichneten Strecken können weitere Abschnitte für die Beschattung ausgewählt werden. Dabei sollen insbesondere fischökologische Kriterien (Strukturen im Flussbett, bisheriges Auftreten der Fische) berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 5).

Im ersten Szenario wurde nun angenommen, dass bei Flusskilometer 11.1 eine Strecke von 200 m beschattet wird. In einem zweiten Szenario wurde angenommen, dass an derselben Stelle eine Strecke von 400 m beschattet wird. Im Modell bedeutet Beschattung, dass auf den entsprechenden Abschnitten die Solarstrahlung reduziert wird. Durch Beschattung ist eine Reduktion um maximal 90 % möglich, die restlichen 10 % sind auf die Streuung der Atmosphäre zurückzuführen und fallen nur bei einer kompletter Bedeckung des Bachbetts mit Büschen weg. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die resultierenden Temperaturen am Ende der Strecke für den Zeitraum 28. Juni bis 1. Juli bzw. 20. bis 23. Juli. Bei 400 m Beschattung ist die maximale Wassertemperatur um bis zu 3.9 °C geringer als ohne Beschattung. Neben den absoluten Werten der Wassertemperatur wird auch die tägliche Amplitude reduziert. Nach bisherigen Untersuchungen sind aber grosse Amplituden weniger problematisch für Fische als hohe absolute Temperaturen (A. Peter, persönliche Mitteilung).

Bei Abbildung 10 ist zu beachten, dass die modellierten Temperaturen in der Nacht nur wenig abnehmen. Hier stösst das Modell an seine Grenzen, da bei geringem Abfluss der Austausch mit dem Sediment und dem Grundwasser an Bedeutung gewinnt und dieser nicht ausreichend genau wiedergegeben werden kann. Wichtig für die Fragestellung sind aber der Verlauf während des Tages und die maximalen Temperaturen, bei denen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten besteht.

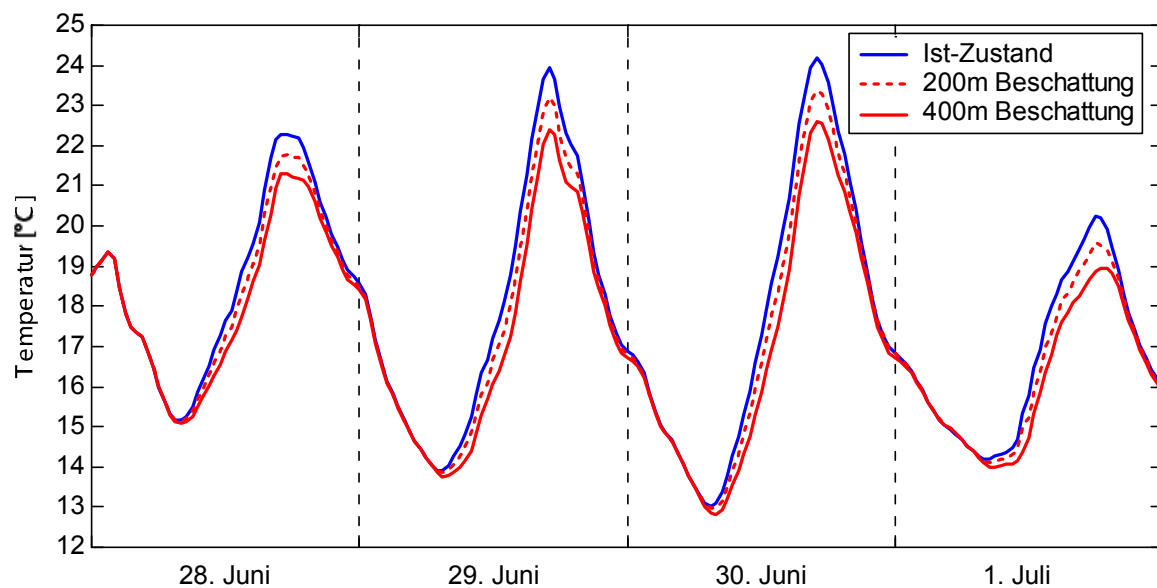


Abbildung 9: Simulierte Wassertemperaturen mit verschiedenen Beschattungsszenarien, 28. Juni bis 1. Juli 2004. Aufgezeichnet ist die Temperatur am Ende der 200 m resp. 400 m langen Strecke sowie die modellierte Temperatur an derselben Stelle im Ist-Zustand.

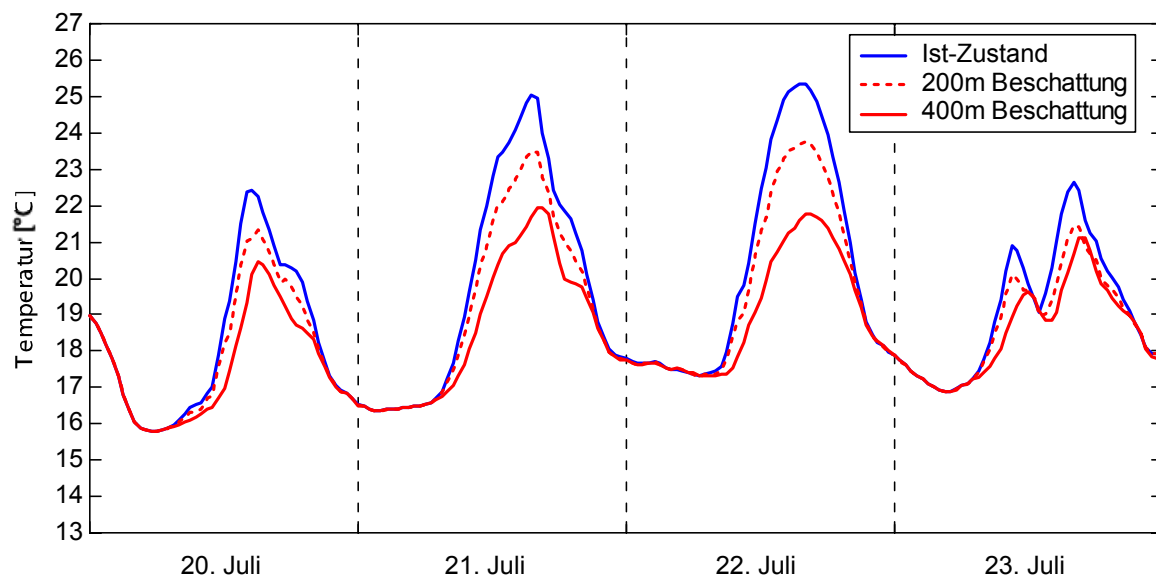


Abbildung 10: Simulierte Wassertemperaturen mit verschiedenen Beschattungsszenarien, 20. bis 23. Juli 2004. Aufgezeichnet ist die Temperatur am Ende der 200 m resp. 400 m langen Strecke sowie die modellierte Temperatur an derselben Stelle im Ist-Zustand.

Neben der Temperatur am Ende der beschatteten Strecke ist auch der Temperaturverlauf über den gesamten Flussabschnitt zu beachten. In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist dieser Längsverlauf für den 30. Juni bzw. den 22. Juli dargestellt. Die ersten 6.5 km sind nicht wiedergegeben, da auf dieser Strecke Grundwasser, bzw. das versickerte Wasser des Biblanc eintritt und der Längsverlauf der Temperatur nicht genau bekannt ist. Es wird der Temperaturverlauf um 15:00 gezeigt, was in etwa der Zeit entspricht, in der die maximalen Temperaturen auftraten (am 30. Juli trat das Maximum etwas später, am 22. Juli etwas früher auf).

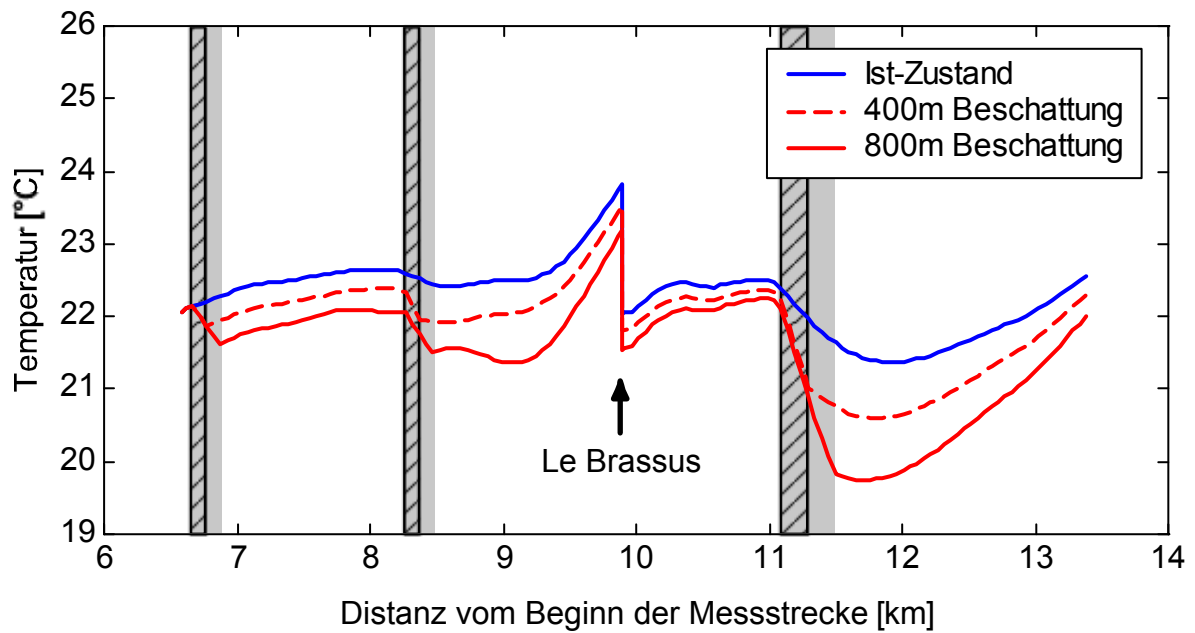


Abbildung 11: Längsverlauf der Temperatur am 30. Juni 2004, 15:00, mit und ohne Beschattung. Die schraffierten Zonen stellen die beschatteten Strecken im ersten Szenario dar (insgesamt 400 m Beschattung), die grauen Zonen stellen die beschatteten Strecken im zweiten Szenario dar (insgesamt 800 m Beschattung).

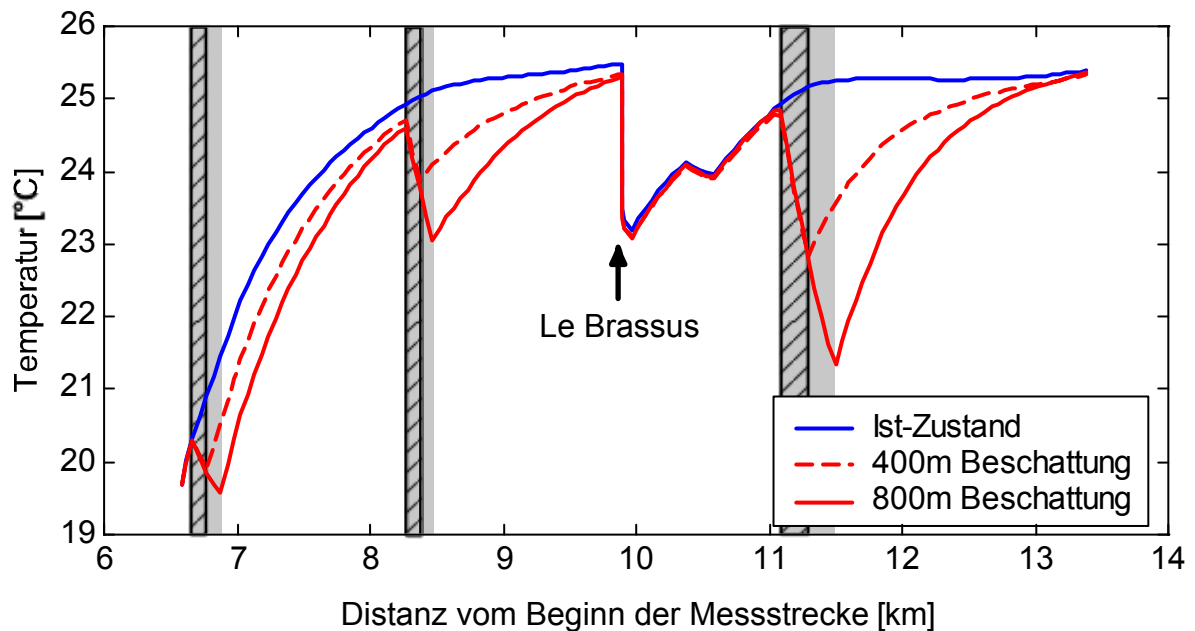


Abbildung 12: Längsverlauf der Temperatur am 22. Juli 2004, 15:00, mit und ohne Beschattung. Die schraffierten Zonen stellen die beschatteten Strecken im ersten Szenario dar (insgesamt 400 m Beschattung), die grauen Zonen stellen die beschatteten Strecken im zweiten Szenario dar (insgesamt 800 m Beschattung).

Die blauen Kurven in Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Temperaturverlauf im modellierten Ist-Zustand, d. h. ohne zusätzliche Beschattung. In beiden Abbildungen ist zunächst der Einfluss des kalten Zuflusses Le Brassus zu sehen – die Temperatur nimmt bei Flusskilometer 10 um mehrere °C ab. In Abbildung 11 variieren die Temperaturen im Verlauf des Flussabschnitts um ca. 2 °C aufgrund unterschiedlicher Erwärmung je nach Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe, diese Variationen pflanzen sich im Lauf der Zeit flussabwärts fort.

Abbildung 12 zeigt eine Situation bei geringem Abfluss. Der geringe Abfluss hat zur Folge, dass zu Beginn der modellierten Strecke, bei Flusskilometer 6.5, der Einfluss des kalten Biblanc bzw. des Grundwassers grösser und die Temperatur entsprechend niedriger ist. Aufgrund der kleineren Fließgeschwindigkeit steigt die Temperatur aber innerhalb weniger Kilometer stark an und nähert sich einem Maximalwert von ca. 25.5 °C. Bei Flusskilometer 10.5 ist eine leichte Abkühlung durch die bereits gegebene Beschattung zu erkennen (teilweise Beschattung durch Gebüsch).

Die beiden roten Kurven in Abbildung 11 und Abbildung 12 stellen zwei Beschattungsszenarien dar. Die gestrichelte Kurve zeigt den Temperaturverlauf für das Szenario, dass bei km 6.7 und 8.3 je 100 m Flussstrecke und bei km 11.1 weitere 200 m beschattet werden. Entlang dieser drei relativ kurzen Strecken nimmt die Temperatur sichtbar ab. Die durchgezogene rote Kurve beschreibt den Temperaturverlauf für den Fall, dass die beschatteten Strecken doppelt so lang sind (insgesamt 800 m).

Am 30. Juni (Abbildung 11) wird die Temperatur im Verlauf der beschatteten Strecke um bis zu 1.8 °C reduziert und die Temperaturen bleiben über den gesamten Flussverlauf geringer als ohne Beschattung. Am 22. Juli (Abbildung 12), zur Zeit des geringen Abflusses, nimmt die Wassertemperatur um bis zu 3.9 °C ab, wie bereits in Abbildung 10 gezeigt wurde. Allerdings erreicht die Temperatur rund 2 km unterhalb der beschatteten Strecke wieder die hohen Werte des Ist-Zustands. Verallgemeinert kann gesagt werden:

- Bei einem für den Frühsommer typischen Abfluss (ca. 120 – 200 L/s) kann die maximale Wassertemperatur durch Beschattung über mehrere 100 m in der Grössenordnung von 1 – 2 °C reduziert werden, und die Temperatur bleibt über den gesamten Flussverlauf niedriger.
- Bei einem typischen Niedrigabfluss im Sommer (ca. 40 – 80 L/s) kann die maximale Wassertemperatur durch Beschattung in der Grössenordnung von 4 °C reduziert werden, die Temperatur erreicht aber anschliessend nach wenigen unbeschatteten Kilometern wieder dieselben Werte wie ohne Beschattung.

Das rasche Absinken und der anschliessende Anstieg der Temperatur im Fall des geringen Abflusses sind auf die kurze Austauschzeit zurückzuführen. Die Austauschzeit t_A gibt an, innerhalb welcher Zeit sich die Wassertemperatur einer Gleichgewichtstemperatur bis auf eine Differenz von ~5 % annähert:

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

wobei h die Wassertiefe, ρ die Dichte, c_p die Wärmekapazität und A einen empirischen Austauschkoefizient ($35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, Kuhn, 1977) darstellt. Aus der Formel ist ersichtlich, dass sich die Wassertemperatur umso rascher der Gleichgewichtstemperatur nähert, je geringer die Wassertiefe h ist. Dies hat zur Folge, dass sich die Wassertemperatur im Sommer, bei geringer Wassertiefe und geringer Fließgeschwindigkeit, nach der beschatteten Strecke innerhalb weniger Kilometer wieder an die ursprüngliche Gleichgewichtstemperatur anpasst.

Umgekehrt würde auch bei vollständiger Beschattung des gesamten Flusses innerhalb weniger Kilometer eine Gleichgewichtstemperatur erreicht. Eine Modellrechnung mit vollständiger Beschattung (Zeitraum 20. bis 23. Juli 2004) zeigte, dass die Orbe in diesem Fall eine Temperatur von rund 18°C erreichen würde, die damit knapp über den gemessenen Temperaturen während der Nacht liegt.

Die in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellte Temperaturabnahme kommt durch die Kombination zweier Effekte zustande: Erstens weist das Wasser beim Eintritt in die beschattete Strecke eine geringere Temperatur als zur Zeit des Temperaturmaximums auf (dieser Eintritt geschieht aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit in der 400 m langen Strecke rund 70 Minuten früher). Zweitens wird das Wasser entlang der beschatteten Strecke durch den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und dem Sediment abgekühlt. Für das in Abbildung 12 gegebene Beispiel der Strecke von Flusskilometer 11.1 bis 11.5 beträgt der Temperaturunterschied aufgrund des ersten Effekts rund 0.2°C und der Temperaturunterschied aufgrund der Abkühlung 3.2°C . Wird zusätzlich die Erwärmung im Fall ohne Beschattung addiert (Anstieg der blauen Kurve in Abbildung 11 zwischen Flusskilometer 11.1 und 11.5, ca. 0.5°C), erhält man den gesamten Temperaturunterschied von 3.9°C .

Um die Solarstrahlung – wie im Modell angenommen – abzuhalten, kann eine Baumreihe südlich des Bachbetts angepflanzt werden. Die Bäume müssen dicht genug stehen, damit kein oder nur sehr wenig direktes Sonnenlicht den Fluss erreicht. Andernfalls verringert sich die Effektivität der Massnahme.

Bei der Uferbestockung ist auch die gewählte Höhe entscheidend. Der Sonnenhöchststand α beträgt an der Orbe 67° über der Horizontalen:

$$\alpha = 90^\circ - 46^\circ (\text{geographische Breite}) + 23^\circ (\text{Ekliptik})$$

Damit ein 5 m breites Flussbett auch bei Sonnenhöchststand vollständig beschattet wird, muss die Bepflanzung rund 12 m hoch sein (Abbildung 13). Ist dies nicht der Fall, so verringert sich der Effekt auf die Temperatur. Wird z. B. nur die Hälfte des Flussbettes beschattet, oder ist die Beschattung nur während der Hälfte des Tages wirksam, so hat dies in etwa denselben Effekt, wie wenn die beschattete Länge halbiert wird (z. B. Szenario 1 statt Szenario 2 in Abbildung 11 und Abbildung 12). Wird eine Ufervegetation angepflanzt, die über den Bach hängt, verringert sich die notwendige Höhe. Durch eine standortgerechte Vegetation mit Ästen, die ins Wasser hängen, können zusätzliche Unterstände für Fische entstehen.

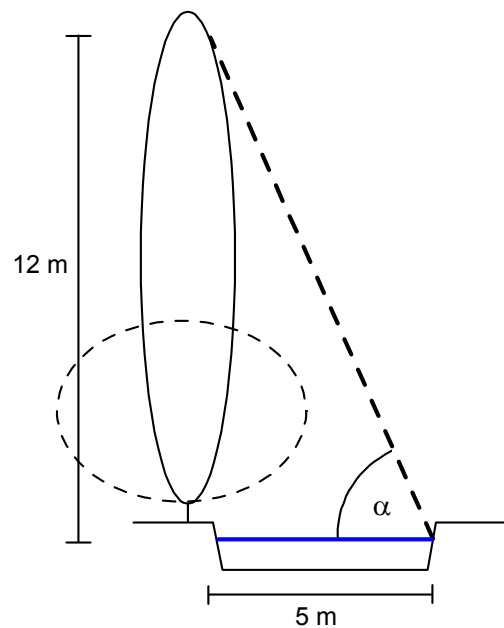


Abbildung 13: Querprofil der Orbe mit Uferbestockung. Bei einem Sonnenwinkel α von 67° über der Horizontalen ist eine Höhe der Bepflanzung von ca. 12 m nötig.

Schliesslich sollte beachtet werden, dass durch die Beschattung eventuell vorhandene Wasserpflanzen zurückgehen werden. Dies kann dazu führen, dass die Fliessgeschwindigkeit zunimmt und das Wasser damit weniger lange im beschatteten Abschnitt verbleibt als erwartet. Es sollten deshalb eher Abschnitte beschattet werden, die nicht mit Wasserpflanzen bewachsen sind. Wasserpflanzen können je nach den Gegebenheiten auch als Fischunterstände dienen. Andererseits kann ein unnatürlich starkes Wachstum von Wasserpflanzen durch Beschattung reduziert werden. Es sollte deshalb im Einzelfall entschieden werden, ob ein mit Wasserpflanzen bewachsener Abschnitt beschattet wird oder nicht.

4.4. Einfluss von Wasserentnahmen

Aus den Zuflüssen der Orbe – auf französischem Gebiet sowie aus dem Zufluss Le Brassus – wird Trinkwasser entnommen. Geschieht die Wasserentnahme in grösseren Mengen, so führt dies zu geringerem Abfluss und in der Folge zu einer stärkeren Erwärmung. Es wurden langjährige Abflussdaten (seit Inbetriebnahme der Abflussmessungen durch das BWG) betrachtet, um zu überprüfen, ob dieser in den vergangenen Jahrzehnten abnahm. Abbildung 14 zeigt, dass die Fluktuationen von Jahr zu Jahr gross sind, aber kein genereller Trend über diesen Zeitraum besteht. Auch bei den minimalen Abflüssen, welche für die Temperaturentwicklung besonders kritisch sind, ist kein Trend zu erkennen.

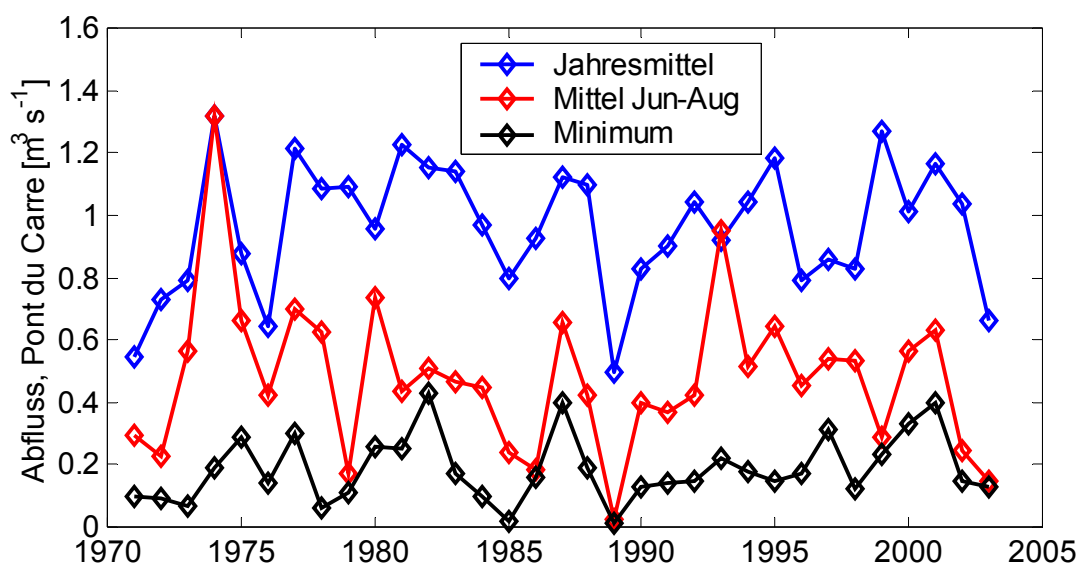


Abbildung 14: Verlauf des Abflusses der Orbe seit 1971: Jahresmittel, Mittelwert Juni bis August, sowie jährliche Minima.

Aus dem Zufluss Le Brassus wird Trinkwasser für den Ort Le Brassus entnommen. Der Wasserverbrauch je 1000 Einwohner liegt bei rund $160 \text{ m}^3/\text{Tag}$, dies entspricht einem mittleren Abfluss von nur etwa 2 L/s . Selbst wenn eine zusätzliche Wasserentnahme für Industrie und Gewerbe berücksichtigt wird, verringert sich der Abfluss durch die Wasserentnahme um nur wenige L/s . Der geschätzte minimale Abfluss des Brassus beträgt im Sommer rund 40 L/s .

5. Schlussfolgerungen

Aus der Analyse der gemessenen Wassertemperaturen und den Modellrechnungen lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- Durch die Beschattung auf einer Strecke von mehreren 100 m lässt sich die maximale Wassertemperatur der Orbe um mehrere Grad C reduzieren (z. B. bei Niedrigabfluss durch Beschattung auf einer 400 m langen Strecke um bis zu 4 °C). Bei größerem Abfluss ist der Effekt der Beschattung geringer; zu diesen Zeiten sind jedoch die maximalen Wassertemperaturen im Normalfall deutlich kleiner.
- Im Anschluss an eine beschattete Strecke erreicht die Wassertemperatur bei Niedrigabfluss innerhalb weniger Kilometer wieder die ursprünglichen hohen Werte. Aus fischökologischer Sicht ist es wertvoller, einzelne Abschnitte von mehreren 100 m intensiv zu beschatten (um stellenweise möglichst niedrige Temperaturen zu erhalten), statt eine teilweise Beschattung über die gesamte Flussstrecke zu verteilen.
- Der modellierte Effekt tritt nur bei einer vollständigen Beschattung auf (ausreichend hohe Bepflanzung, oder eine Uferbestockung, die über das Flussbett hängt). Bei weniger hoher oder lückenhafter Bepflanzung reduziert sich der Effekt auf die Wassertemperatur entsprechend den beschatteten Wasserflächen.
- Zur Auswahl der Strecken für die Beschattung können die folgenden Kriterien dienen: (a) Strecken mit geringer Fließgeschwindigkeit. Das Modell gibt dazu einen Anhaltspunkt; die Fließgeschwindigkeiten können aber auch einfach im Feld überprüft werden. (b) Von West nach Ost ausgerichtete Strecken (für eine effektive Beschattung auf der Südseite). (c) Strecken mit hohen Wassertemperaturen (d. h. nicht direkt unterhalb der kühlen Zuflüsse). (d) Aus fischökologischer Sicht wertvolle Strecken. (e) Strecken mit geringem Bewuchs von Wasserpflanzen (je nach Zielsetzung).
- Wird eine Strecke beschattet, so sollte ein einfaches Monitoring in Betracht gezogen werden: Zu Beginn und am Ende der Strecke kann die Wassertemperatur mit Hilfe von Temperaturloggern kostengünstig aufgezeichnet werden. Damit lässt sich der Effekt der Beschattung auf die Flusstemperatur, insbesondere während der kritischen Saison, direkt quantifizieren. Weitere Effekte auf die Fischpopulation (z.B. der vermehrte Aufenthalt von Fischen in den beschatteten Strecken) könnten durch Befischungen überprüft werden.

Quellenangaben

Elliott, J. M. (1981). Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. In *Stress and Fish* (A. D. Pickering, ed.), S. 209-245. Academic Press, London.

Frey, M. (2002). Temperaturmodellierung – Auswirkungen von Kraftwerken auf das Temperaturregime in Zuflüssen der Rhône. Diplomarbeit. Rhône-Thur Publikation Nr. 2, ETH Zürich/EAWAG Kastanienbaum, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.

Küttel, S., A. Peter und A. Wüest (2002). Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. Rhône-Thur Publikation Nr 1. EAWAG, Kastanienbaum, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.

Kuhn, W. (1977). Berechnung der Temperatur und Verdunstung alpiner Seen auf klimatologisch-thermodynamischer Grundlage. Arbeitsbericht der SMA, 70. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.

Meier, W. (2002). Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. Dissertation ETH Nr. 14526. Ökostrom Publikation Band 11.

Meier W., C. Bonjour, A. Wüest and P. Reichert (2003). Modelling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams; *J. Environmental Engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:8(755).

Paquet, G. (2002). Biologie et écologie de l'ombre commun (*Thymallus thymallus* L.) dans l'Orbe à la Vallée de Joux, canton de Vaud, Suisse. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.

Persat, H. (1988). De la biologie des populations de l'ombre commun *Thymallus thymallus* (L. 1758) à la dynamique des communautés dans un hydrosystème fluvial aménagé, le Haut-Rhône français. Éléments pour un changement d'échelles. Thèse d'Etat, Université Claude-Bernard, Lyon.

Anhang

Daten zu den Flussabschnitten

Quelle: Service des forêts, de la faune et de la nature du Canton de Vaud.

Anfangskoordinaten x [m]	Anfangs- y [m]	Anfangs- höhe [m]	Länge des Abschnitts [m]	Kumul. Länge [m]	Fließ- geschw. [cm/s]	Breite [m]	benetzte Breite [m]	Tiefe [cm]	gemessener Abfluss [L/s]	Gefälle [‰]	Bemerkungen
5012739	1561207	1040	1320	1320	23	3.6	3.6	20	200	0.3	Temperatursonde 1
5018729	1566795	1036	910	2230	18	4.3	4.3	25	240	0.22	
5022466	1571905	1034	800	3030	10	4	4	80	300	0.13	
5027361	1575068	1033	810	3840	15	5.5	5.5	45	300	0.12	Temperatursonde 2
5031430	1579188	1032	700	4540	32	4	4	25	280	0.14	
5035700	1582426	1031	1070	5610	26	3.8	3.8	30	280	0.28	Zufluss Le Biblanc
5039378	1586968	1028	560	6170	35	3.5	3.5	25	280	0.54	
5043231	1590269	1025	420	6590	30	3.8	3.8	40	280	0.48	Temperatursonde 3
5046518	1591546	1023	800	7390	24	2.8	2.8	45	250	0.38	
5048203	1595450	1020	860	8250	25	3.4	3.4	35	250	0.23	Temperatursonde 4
5053295	1599050	1018	970	9220	18	3.8	3.8	50	280	0.21	
5058981	1602682	1016	670	9890	28	5	4.5	25	340	0.15	Temperatursonde 5,
5062325	1606668	1015	590	10480	18	5.1	5.1	75	350	0.51	Zufluss Le Brassus
5066355	1608671	1012	220	10700	4	5.5	5.5	80	350	0.45	
5066360	1609750	1011	380	11080	19	6	6	48	320	0.26	Temperatursonde 7
5066964	1612250	1011	950	12030	13	5.3	5.3	40	300	0.21	
5070505	1616328	1009	790	12820	20	6.3	6.1	50	320	0.13	
5071804	1619867	1009	570	13390	18	9.8	9.2	25	400	0.18	Temperatursonde 8
5077049	1621889	1009	860	14250	10	10	9.5	38	380	0.23	
5083588	1622711	1007	540	14790	1	28	28	180	430	0.19	Temperatursonde 9
5085426	1625323	1006	870	15660	1	30	29	180	420	0.11	

Eingabedaten / im Modell verwendete Variablen

alpha: Böschungswinkel. Jeweils 0 gesetzt.

f: Reibungskoeffizient. Durch Parameterschätzung bestimmt. $f = 1.18$.

fs: Anteil der Sonneneinstrahlung, der ins Sediment geht. Durch Parameterschätzung bestimmt. $fs = 0.12$

HS: Globalstrahlung. Bestimmt aus der Globalstrahlung von La Dôle nach:

$$HS = HS(\text{La Dôle}) \cdot 0.8555.$$

h_ini: Wassertiefen zu Beginn. Abgeschätzt.

K: Thermische Leitfähigkeit des Sediments. Durch Parameterschätzung bestimmt. $K = 30 \text{ W/m/K}$

kb: Beschattungskoeffizient. Durch Begehung wurden Flussabschnitte bestimmt, die teilweise beschattet sind. Für insgesamt 1200 m Flussabschnitt wurde ein Beschattungskoeffizient von 20 % geschätzt, für weitere 300 m Flussabschnitt ein Beschattungskoeffizient von 10 %. Für den Rest der Untersuchungsstrecke beträgt der Beschattungskoeffizient 0.

k_sed: Koeffizient für Wärmeaustausch mit dem Sediment. Durch Parameterschätzung bestimmt. $k_{\text{sed}} = 100000 \text{ J/K/m}^2$

latitude: geographische Breite. latitude = 46.3°

longitude: geographische Länge. longitude = 6.1°

p: Luftdruck. Konstant angenommen. p = 100 mbar

Qin: Gemessener Abfluss am Beginn der Untersuchungsstrecke. Aus BWG-Station „Le Chenit/frontière“.

Qini: Abfluss entlang des Flusses zu Beginn. Abgeschätzt aus Qin und Qend

Qend: Gemessener Abfluss am Ende. Aus SESA-Station „Le Sentier“.

q_biblanc: Zufluss Le Biblanc. Abgeschätzt nach $q_biblanc = Q_{in} \cdot 0.32 + 0.015$

q_brassus: Zufluss Le Brassus. Abgeschätzt nach $q_brassus = Q_{in} \cdot 0.64 + 0.03$

RH: Relative Luftfeuchtigkeit. Bestimmt aus der relativen Luftfeuchtigkeit von La Dôle nach $RH(\%) = -11.67 + 1.267 \cdot RH(\text{La Dôle}) - 0.0015 \cdot RH(\text{La Dôle})^2$

TA: Zeitreihe der Lufttemperatur. Bestimmt aus der Lufttemperatur von La Dôle nach $TA = 2.03 + 0.966 \cdot TA(\text{La Dôle}) + 0.0018 \cdot T(\text{La Dôle})^2$

Tend: Zeitreihe der Wassertemperatur am Ende der Strecke (Messstation 8).

Tin: Zeitreihe der Wassertemperatur am Beginn der Strecke (Messstation 1).

T_biblanc: Zeitreihe der Wassertemperatur Le Biblanc. Annahme: Identisch mit T_brassus (Messstation 6).

T_brassus: Zeitreihe der Wassertemperatur Le Brassus. (Messstation 6).

Tini: Wassertemperatur entlang des Flusses zu Beginn (aus Messstationen 1 - 8).

Ts: Sedimenttemperatur. Abgeschätzt. $T_s = 18^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}$ (während der betrachteten Sommerperioden).

TSini: Sedimenttemperatur entlang des Flusses zu Beginn. $TS_{ini} = T_s$.

u10: Windgeschwindigkeit. Bestimmt aus der Windgeschwindigkeit von La Dôle nach $u = 0.374 \cdot u(\text{La Dôle}) - 0.0027 \cdot u(\text{La Dôle})^2$

w_bed: Breite des Flussbetts. Aus Daten zu den Flussabschnitten.

zB: Höhe des Flussbetts über Meer. Aus Daten zu den Flussabschnitten.