

# Wie halten wir unsere Fliessgewässer kühl?

## Untersuchung von Temperatureinflüssen und Visualisierung des Temperaturverlaufs in Fliessgewässern

### Ableitung von Massnahmenvorschlägen zur Kühlung unserer Fliessgewässer im Hinblick auf die Klimaerwärmung

Autoren: Matthias Mende, IUB Engineering, Bern  
Pascal Sieber, Sieber Liechti GmbH, Ennetbaden

29. April 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Methodik</b>	<b>3</b>
2.1 Untersuchungsgebiet	3
2.2 Eingesetzte Messinstrumente	4
2.3 Vorgehen, Ablauf der Messungen	5
2.4 Messungen an den Fliessgewässern	5
<b>3 Ergebnisse</b>	<b>5</b>
3.1 Thermische Charakteristika der untersuchten Gewässer	5
3.2 Tagesverlauf der Wassertemperatur	8
3.3 Temperaturdrift	8
3.4 Beschattung (fehlende / starke)	9
3.5 Eindolungen	10
3.6 Einleitungen aus Kläranlagen (ARA)	10
3.7 Seitenbäche	11
3.8 Grundwasser	11
3.9 Restwasserstrecken und Wasserrückgaben von Ausleitungskraftwerken	12
3.10 Gewässerumfeld: Siedlungsgebiet / Offenland / Wald	13
3.11 Gewässerstruktur	13
3.12 Biberdämme	13
<b>4 Empfehlungen</b>	<b>14</b>
<b>Dank</b>	<b>17</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>17</b>

## Zusammenfassung

Daten zum Klimawandel zeigen, dass nicht nur die Lufttemperaturen ansteigen, sondern auch die Wassertemperaturen unserer Fliessgewässer. Gemäss Klimaszenarien CH2018 werden die bodennahen Lufttemperaturen in den nächsten 100 Jahren im Sommer um 2.5 – 4.5°C ansteigen. Für Fliessgewässer ist von einer vergleichbaren Erwärmung auszugehen, sofern keine Massnahmen zu ihrer Kühlung ergriffen werden. Die Folgen für die aquatischen Lebewesen wären fatal.

Im vorliegenden Projekt wurden die Wassertemperaturen kleiner bis mittlerer Fliessgewässer an heissen Sommertagen untersucht. Dabei konnten erstmals Wassertemperaturen im gesamten Längsverlauf eines Fliessgewässers quantifiziert und dargestellt werden. Untersucht wurden der Erusbach (Kanton AG), die Wyna (AG), die Jonen (Kanton ZH) und die Sihl (ZH). Die Resultate der Messungen erlauben vielfältige Aussagen.

Eine Temperaturdrift, d.h. die Verlagerung eines Wasservolumens mit einer bestimmten Temperatur in Fliessrichtung findet grundsätzlich immer statt. Sie ist umso ausgeprägter, je grösser der Massentransport, also der Abfluss ist. Bei kleinen Fliessgewässern ist dieser Effekt von untergeordneter Bedeutung, weil er von lokalen Einflüssen (z.B. Beschattung) überlagert wird. Bei grösseren Fliessgewässern (Sihl) findet infolge des Massentransports eine kontinuierliche Temperaturzunahme in Fliessrichtung statt, sofern nicht relativ grossräumige Einflüsse entgegenwirken.

Die kleineren Fliessgewässer (Erusbach, Jonen, Wyna) zeigen einen sehr heterogenen Temperaturverlauf. Die Wassertemperatur steigt und fällt kleinräumig in Abhängigkeit von lokalen Einflussfaktoren. Der Beschattungsgrad ist hierbei der wichtigste Einflussfaktor. Wenig oder unbeschattete Gewässerabschnitte (0-40% Beschattung) von 1-2 km Länge führen zu einer deutlichen Zunahme der Wassertemperatur von  $\Delta T = +2.4^{\circ}\text{C}$  bis zu  $+3.9^{\circ}\text{C}$ . Bei einer «mittleren Beschattung» (ca. 40-60% Beschattung) findet in Fliessrichtung keine nennenswerte Erhöhung der Wassertemperatur statt.

Bei sehr hohen Eingangswerten kommt es im Verlauf ausreichend beschatteter Strecken (ca. 50-70% Beschattung) zu leichter Abkühlung. Die stärksten Abkühlungen wurden bei starker Beschattung (ca. 70-100% Beschattung) innerhalb von Waldgebieten und durch Eindolungen nachgewiesen. Lokal konnten im Wald Abkühlungen von bis zu  $\Delta T = -3.8^{\circ}\text{C}$  auf 300 m Gewässerlänge festgestellt werden (Kap. 3.4).

Eine deutliche Unstetigkeit im Temperaturverlauf zeigt sich an der Sihl im Bereich der Wasserrückgabe des Ausleitungskraftwerks Waldhalde. Innerhalb der 4.5 km langen Restwasserstrecke steigt die Wassertemperatur in Fliessrichtung deutlich stärker als unterhalb davon (Restwasserstrecke:  $\Delta T = +4.7^{\circ}\text{C}$  auf 4500 m Gewässerlänge). Starke Abflussreduktionen durch Ausleitungen führen somit zu einer deutlichen Verschärfung des Hitzestresses der Gewässerbewohner in der Restwasserstrecke.

Ebenso wie Ausleitungen haben auch Einleitungen bzw. Zuflüsse einen Einfluss auf die Wassertemperatur. Die Kläranlagen führten in den untersuchten Gewässern im Mittel zu einer leichten Temperaturerhöhung von ca.  $1^{\circ}\text{C}$  (Kap. 3.6). Die Maximaltemperaturen wurden durch die Einleitungen jedoch um bis zu  $\Delta T = -2.0^{\circ}\text{C}$  gemindert.

Der Einfluss von Grundwasserexfiltration in das Gewässer wurde im Projekt nicht gezielt untersucht. Auf einem Abschnitt des Erusbachs, auf dem trotz fehlender Beschattung eine Abkühlung von  $1.7^{\circ}\text{C}$  auftritt, ist der Einfluss von Grundwasser naheliegend (Kap. 3.8).

Es konnte kein Einfluss von Biberdämmen in Gewässern auf die Wassertemperatur nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen decken sich weitgehend mit den Erfahrungen anderer Autoren. Sie zeigen deutlich, dass auch in der Schweiz an kleinen und mittleren Gewässern eine Verringerung der Wassertemperaturen im Bereich von  $4^{\circ}\text{C}$  bis allenfalls sogar  $5^{\circ}\text{C}$  möglich ist, sofern die Gewässer stark beschattet und nach Möglichkeit von Wald oder einem breiten Gehölzstreifen umgeben sind.

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Wassertemperatur ist ein Schlüsselfaktor für den ökologischen Zustand der Fliessgewässer. Sie beeinflusst eine Vielzahl biologischer, physikalischer und chemischer Prozesse und wirkt sich somit direkt auf alle im Wasser lebenden Organismen aus.

In heissen Sommern und insbesondere an Hitzetagen sind die Wirbellosen und die Fische wie z.B. die Bachforelle und die Äsche besonders von Änderungen der Wassertemperatur betroffen. Als kritisch gelten für Bachforellen Temperaturen von über 19.0°C (Elliot et al. 1995) bzw. 19.5°C (Spees 2015). Ab diesen Temperaturen stellen die Fische die Nahrungsaufnahme ein, leiden Stress und werden anfälliger für Krankheiten. Temperaturen von 25°C sind sowohl für die Äsche als auch die Bachforelle bereits bei kurzzeitiger Überschreitung tödlich (Elber et al. 2019).

Die Gründe für die bereits heute meist unnatürlich hohen Wassertemperaturen sind vielfältig:

- Fehlende oder unzureichende Beschattung der Gewässer.
- Überbreite Niedrig- und Mittelwasserprofile.
- Grossflächige künstliche Entwässerung der Böden (z.B. durch Versiegelung, Drainagen und Entwässerungsgräben) und die damit verbundene Absenkung der Grundwasserspiegel.
- Grossflächige, oft standortfremde Nadelbaumforste anstelle von naturnahen Laubwäldern. Generell erwärmen sich Nadelbaumforste deutlich stärker als Laubwälder.

Der Klimawandel verstärkt diese Prozesse, da er nebst einer Erhöhung der Temperatur auch zu einer Verschärfung der Niedrigwassersituationen in Trockenperioden führt.

Das **Ziel** der vorliegenden Arbeit ist es, die Temperatur im Gesamtverlauf von Fliessgewässern zu messen und bildhaft darzustellen, um so Antworten auf folgende Fragen geben zu können:

- Wie verändert sich die Wassertemperatur im Längsverlauf eines Fliessgewässers zu verschiedenen Tageszeiten?
- Welchen Einfluss haben folgende Faktoren auf die Wassertemperatur?
  - Beschattung durch Vegetation
  - Seitliche Zuflüsse
  - Einleitung von geklärtem Wasser (ARA)
  - Eindolungen
  - Harte Verbauungen
  - Natürliche oder naturnahe Gerinneform
  - Biberdämme

Auf diese Weise soll das Bewusstsein für Temperaturprozesse in Fliessgewässern und für die Wirkung von Massnahmen zur Abkühlung geschärft werden. Der Fokus liegt hierbei auf den Bächen und kleinen Flüssen, die etwa 80% unserer Fliessgewässerslängen stellen (Tent 2011). Für ihre Bewohner sind hohe Wassertemperaturen besonders gravierend.

## 2 Methodik

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Es wurden sechs Fliessgewässer in den Kantonen Aargau und Zürich untersucht. Vier dieser sechs Gewässer wurden in ihrem Längsverlauf analysiert: Sihl (Kanton ZH), Jonen (ZH), Wyna (Kanton AG), Erusbach (AG). Der Tegerbach (AG) und der Rickebach (AG) wurden punktuell im Bereich von Biberdämmen untersucht.

Die Auswahl der Gewässer erfolgte gutachterlich im Hinblick auf die Fragestellung und in Absprache mit den Fachstellen der Kantone Aargau und Zürich. Logistische Gründe (Erreichbarkeit) spielten auch eine Rolle bei der Auswahl. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über alle untersuchten Fließgewässer.

Tabelle 1: Kennzahlen der untersuchten Fließgewässer. Die Abfluss-Angaben beziehen sich auf die hydrologischen Messstandorte Sihl, Sihlhölzli (Stations-Nr. 2176); Jonen, Zwillikon (574); Wyna, Unterkulm (0334). Vom Erusbach sind keine Messdaten verfügbar.

	Einzugsgebietsfläche [km <sup>2</sup> ]	Sohlenbreite [m]	Untersuchte Länge [km]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s] Q <sub>182</sub> / Q <sub>347</sub>
Sihl	343	20-40	36	4.3 / 2.7
Jonen	43	3-10	20	0.386 / 0.115
Wyna	92	5-12	14	0.963 / 0.324
Erusbach	24	1-6	11	k. A.

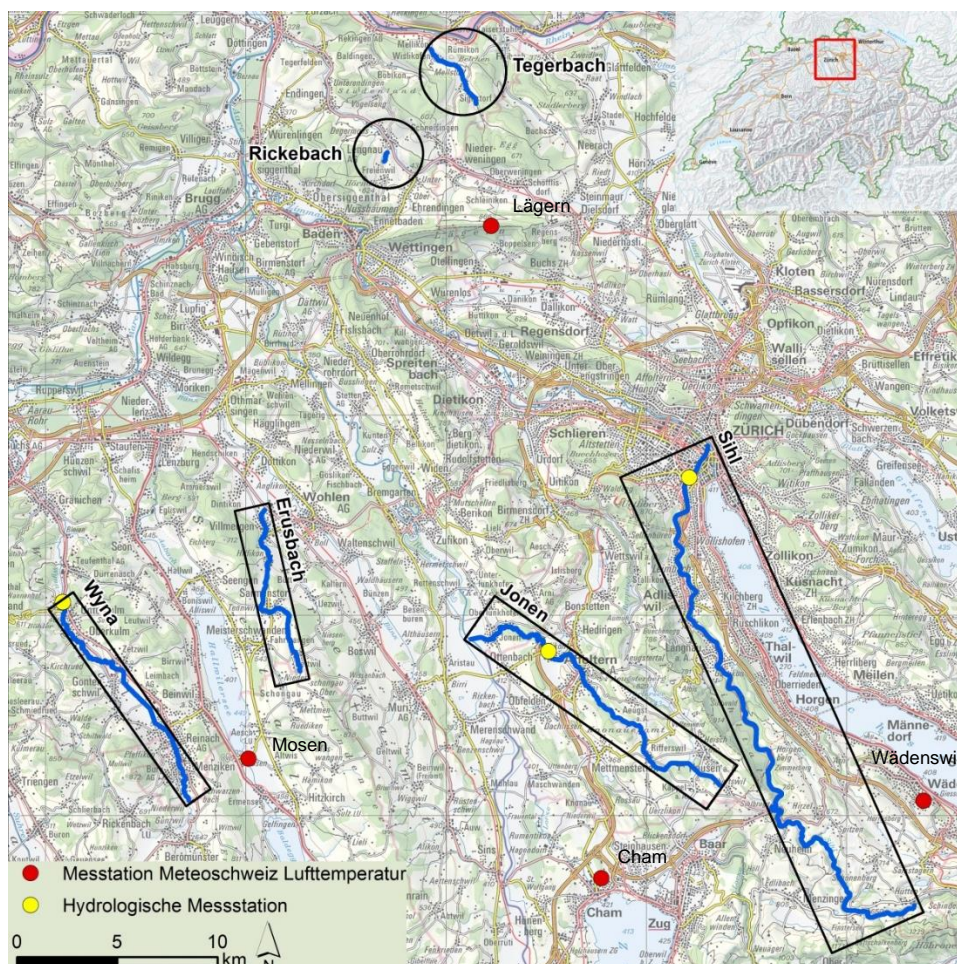


Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Fließgewässerstrecken mit Standorten der Abflussmessstationen und von Temperatur-Messstationen von MeteoSchweiz (Quelle: swisstopo).

## 2.2 Eingesetzte Messinstrumente

Für die Messungen wurden 110 Temperaturlogger der Marke *HOBO® Water Temp Pro v2* der Firma Onset eingesetzt. Alle 110 Logger wurden auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft und fehlerhafte Datenlogger ausgemustert.



### 2.3 Vorgehen, Ablauf der Messungen

Zur Befestigung der Datenlogger wurde ein 60 cm langer Metallstab in die Bachsohle geschlagen, an dem der Logger mittels Briden fixiert und in Fliessrichtung ausgerichtet wurde. Zur Verhinderung einer Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung wurden die Logger mit einer Sonnenabdeckung versehen.

### 2.4 Messungen an den Fliessgewässern

Die Messungen wurden während Hitzeperioden vom 20. Juli bis 2. September 2019 vorgenommen:

Sihl:	9. August, 0.00 Uhr – 13. August 2019, 23.55 Uhr
Jonen:	23. Juli, 0.00 Uhr – 31. Juli 2019, 23.55 Uhr
Wyna:	26. Juli, 0.00 Uhr – 10. August 2019, 23.55 Uhr
Erusbach:	20. Juli, 0.00 Uhr – 31. Juli 2019, 23.55 Uhr
Tegerbach:	23. August, 0.00 Uhr – 2. September 2019, 23.55 Uhr
Rickebach:	23. August, 0.00 Uhr – 2. September 2019, 23.55 Uhr

Für die Auswertungen wurden die Tage mit den höchsten Wassertemperaturen ausgewählt. Die maximalen Lufttemperaturen lagen hier bei den Meteo-Schweiz-Messstationen Mosen und Cham zwischen 33 und 35°C (Erusbach, Jonen, Wyna) und ca. 31°C bei Station Wädenswil (Sihl). Das Messintervall betrug 5 Minuten.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Thermische Charakteristika der untersuchten Gewässer

Bei allen untersuchten Fliessgewässern zeigte sich eine generelle Temperaturzunahme in Fliessrichtung (positiver Temperaturgradient). Dieser Gradient konnte zu jeder Tageszeit festgestellt werden. Dennoch ist der Temperaturverlauf in Fliessrichtung insbesondere bei den kleineren Fliessgewässern Erusbach, Jonen und Wyna sehr inhomogen und zeigt auch negative Gradienten (Abkühlung). Die Temperatur ändert sich in Abhängigkeit von den lokalen Einflussfaktoren relativ kleinräumig.

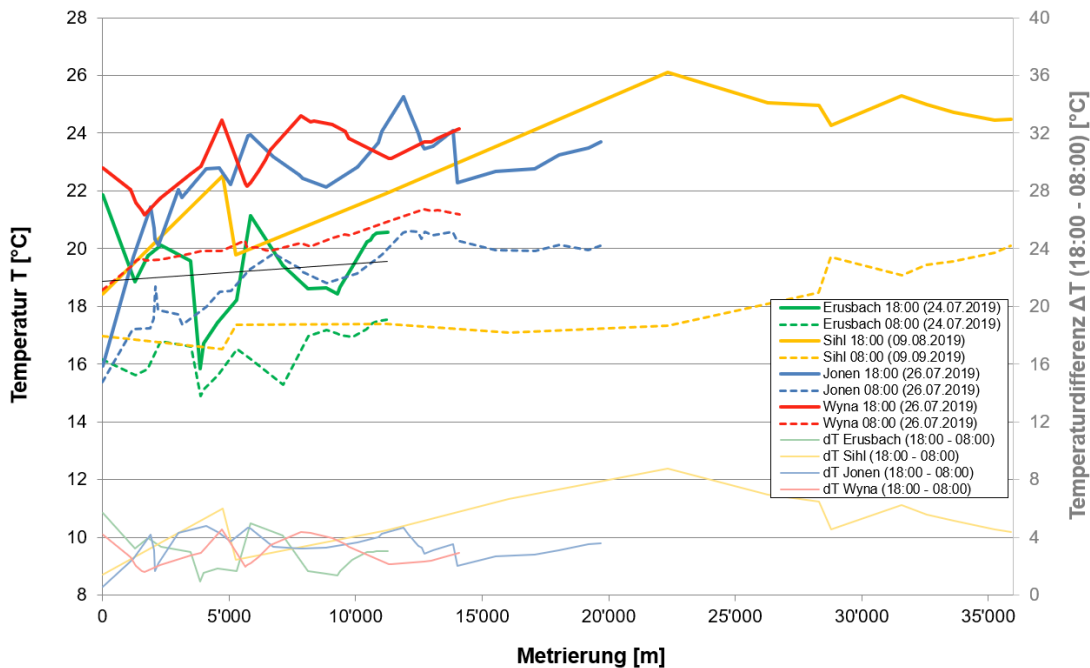


Abbildung 2: Temperatur-Längenprofile für Erusbach, Sihl, Jonen und Wyna jeweils um 8:00 Uhr (gestrichelte Linien) und um 18:00 Uhr (durchgezogene Linien; primäre Y-Achse). Als 0-Punkt ist der oberste Datenlogger definiert. Auf der sekundären Y-Achse (rechts) sind die Temperaturdifferenzen zwischen 08:00 und 18:00 Uhr dargestellt. Die Messungen an den vier Gewässern erfolgten nicht am gleichen Tag.

**Jonen am 26. Juli 2019**

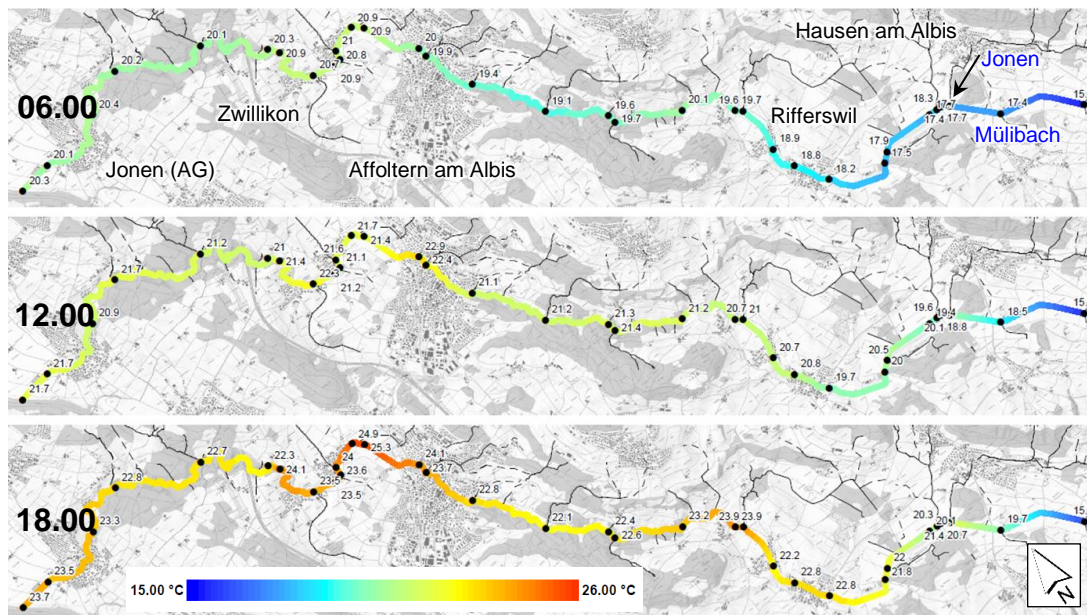


Abbildung 3: Temperaturverlauf in der Jonen am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C. Der Zufluss der Jonen ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet (Fließverlauf von rechts nach links).

Die Jonen zeigt einen heterogenen Temperaturverlauf im Längsverlauf. Die obersten drei Messpunkte wurden im Mülibach gesetzt, weil dieser Abschnitt kanalartig und unbeschattet verläuft und deshalb für die Fragestellung interessant war. Es finden auf der gesamten untersuchten Strecke immer wieder Abkühlungs- und Erwärmungstendenzen statt. Die höchsten Temperaturen wurden etwas unterhalb von Affoltern am Albis gemessen.

### Sihl am 9. August 2019

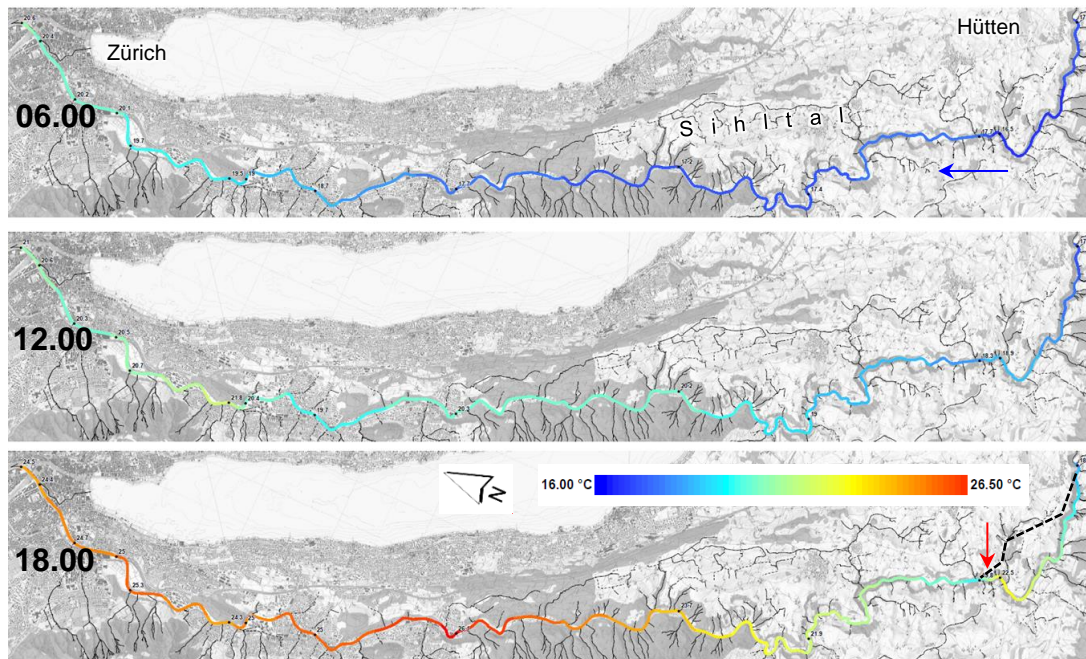


Abbildung 4: Temperaturverlauf in der Sihl am 9. August 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; roter Pfeil: Wasserrückgabe des Kraftwerks Waldhalde; gestrichelt: Stollen KW Waldhalde.

Die Sihl ist mit 17.3°C beim obersten Messpunkt relativ kühl unter Berücksichtigung, dass sich oberhalb ein grosses Einzugsgebiet befindet (250 km<sup>2</sup>). Sie erwärmt sich im Tagesverlauf auf den ersten 4.5 km (Restwasserstrecke Kraftwerk Waldhalde) sehr stark. Die Wasserrückgabe beim Kraftwerk ist durch eine deutliche Abkühlung gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf erwärmt sich die Sihl wieder auf bis zu 26°C.

### Wyna am 26. Juli 2019

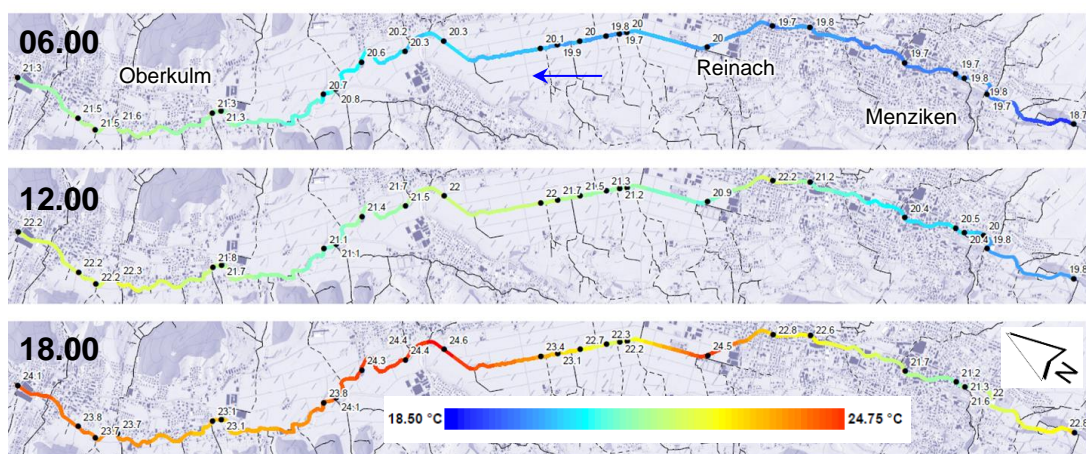


Abbildung 5: Temperaturverlauf in der Wyna am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C.

Ähnlich wie die Jone zeigt auch die Wyna einen grundsätzlichen positiven Temperaturgradienten bei gleichzeitig lokalen Abkühlungs- und Erwärmungserscheinungen, abhängig von lokalen Einflussfaktoren.



### Erusbach am 24. Juli 2019

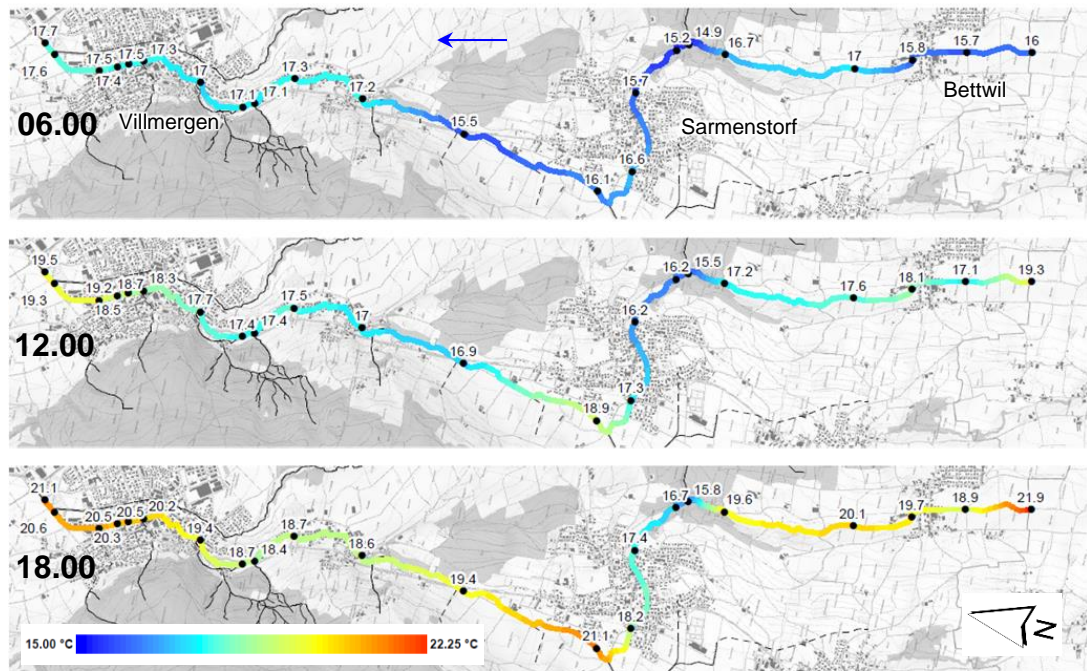


Abbildung 6: Temperaturverlauf im Erusbach am 24. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fliessrichtung: blauer Pfeil.

Der Erusbach ist das einzige Gewässer, bei dem kein eindeutiger positiver Temperaturgradient vom obersten zum untersten Messpunkt festgestellt werden konnte. Lokale Erwärmungs- und Abkühlungserscheinungen sind sehr ausgeprägt.

### 3.2 Tagesverlauf der Wassertemperatur

Der zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung war bei allen Gewässern sehr ähnlich:

- **Minimalwerte** treten in den frühen Morgenstunden kurz nach Sonnenaufgang auf (**ca. 6:00 bis 8:00 Uhr**)
- **Maximalwerte** treten am späten Nachmittag bis frühen Abend auf (**ca. 16:00 – 20:00 Uhr**). Eine Ausnahme bildet die Sihl, das grösste untersuchte Gewässer. Hier treten die höchsten Temperaturen aufgrund von Temperaturdrift (Kap. 3.3) im unteren Projektperimeter teilweise später auf (ca. 22:00 Uhr).
- Zwischen den Minimal- und Maximalwerten erfolgt ein meist sinuskurvenförmiger Anstieg bzw. Abfall.
- Die täglichen Temperaturamplituden liegen zwischen 1 bis 5°C. Für die Sihl wurden Spitzenwerte von über 8°C gemessen (Abbildung 2).

### 3.3 Temperaturdrift

Eine Temperaturdrift, also die Verlagerung eines Wasservolumens einer bestimmten Temperatur in Fliessrichtung, findet grundsätzlich immer statt. Sie ist umso ausgeprägter, je grösser der Massentransport, also der Abfluss ist. Die Temperaturdrift wird von lokalen Einflussfaktoren wie beispielsweise der Beschattung bisweilen stark überlagert.



### 3.4 Beschattung (fehlende / starke)

Für den Kanton Aargau liegt eine Beschattungskarte der Fliessgewässer vor. Das Mass der Beschattung reicht von «keine Beschattung» (0% Beschattung) bis «starke Beschattung» (100%) unterteilt in neun Kategorien. Für die Jonen und die Sihl (beide Kanton Zürich) liegen keine GIS-basierten Beschattungskarten vor. Die Beurteilung erfolgte visuell anhand von Orthofotos.

#### Fehlende oder geringe Beschattung (0 – 40%)

Das Wasser des Mülibachs (Zufluss zur Jonen) tritt am Beginn des Projektgebiets beim Messpunkt J\_a\_01 um 18.00 Uhr mit 15.9°C vergleichsweise kühl aus einer 600 m langen Eindolung aus. Auf der nur ca. 1.8 km langen, im Landwirtschaftsgebiet gelegenen und weitgehend unbeschatteten Strecke bis zum übernächsten Messpunkt findet eine starke Erwärmung auf 21.4°C statt ( $\Delta T = +5.5^\circ C$  um 18.00 Uhr; Abbildung 7).



Abbildung 7: Mülibach (seitlicher Jonenzufluss) am 26.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).

#### Mittlere bis starke Beschattung (60 – 100%)

Eine mittlere bis starke Beschattung (gelb bis dunkelgrün gemäss Beschattungskarte des Kantons Aargau, entsprechen 60 – 100 % Beschattung) kann zu einer markanten Abkühlung des Gewässers führen (s. Bsp. Erusbach, Abbildung 8). Auf einer Länge von 1'220m kühlt er sich auf einem mittel beschatteten Abschnitt zunächst leicht von 20.1 auf 19.6°C ab ( $\Delta T = -0.7^\circ C$ ). Der anschliessende Abschnitt von 320m Länge im Wald mit starker Beschattung führt sogar zu einer weiteren Abkühlung um  $\Delta T = -3.8^\circ C$  auf 15.8°C, wobei ein Grundwasserzustrom möglicherweise mitverantwortlich ist an dieser starken Abkühlung.

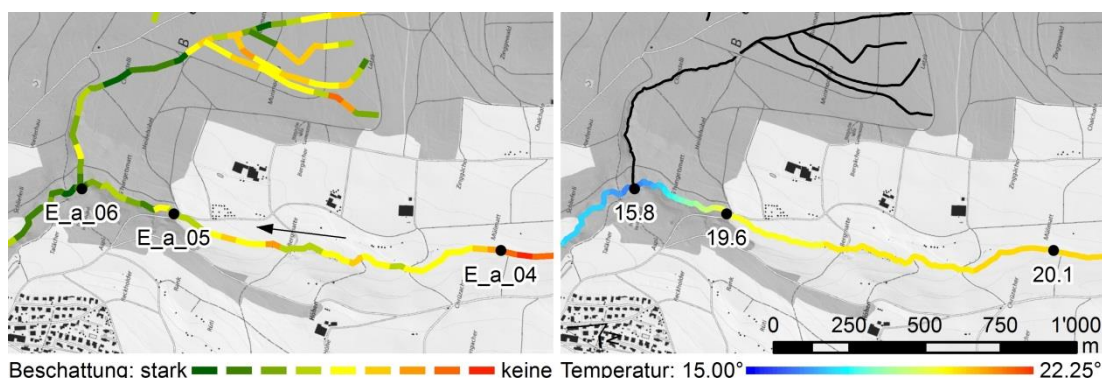


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur im Erusbach (rechts) zwischen Bettwil und Sarmentorf am 24.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C). Der Messpunkt E\_a\_06 liegt oberhalb des seitlichen Zuflusses.

Für den Erusbach wurde die Korrelation zwischen dem Beschattungsgrad (gemäss Beschattungskarte des Kt. AG) und der Wassertemperatur am 24. Juli 2019 berechnet. Hierbei ist anzumerken, dass nur der Beschattungsgrad am Messpunkt selbst in der Analyse berücksichtigt werden konnte, d.h. Einflüsse der unmittelbar oberhalb liegenden Strecke wurden

nicht erfasst. Für den Erusbach konnte ein positiver Zusammenhang zwischen dem Beschattungsgrad und der Wassertemperatur um 16:00 Uhr, wo annähernd die höchsten Temperaturen auftraten, nachgewiesen werden (Korrelationskoeffizient = 0.68, Signifikanzniveau < 0.05; vgl. Abbildung 9). Dies untermauert die These, dass bei kleineren Gewässern vor allem die lokalen Verhältnisse im Umfeld des Messpunkts einen Einfluss auf die Wassertemperatur haben und der Wärmetransport (Temperaturdrift; Kap. 3.3) von untergeordneter Bedeutung ist.

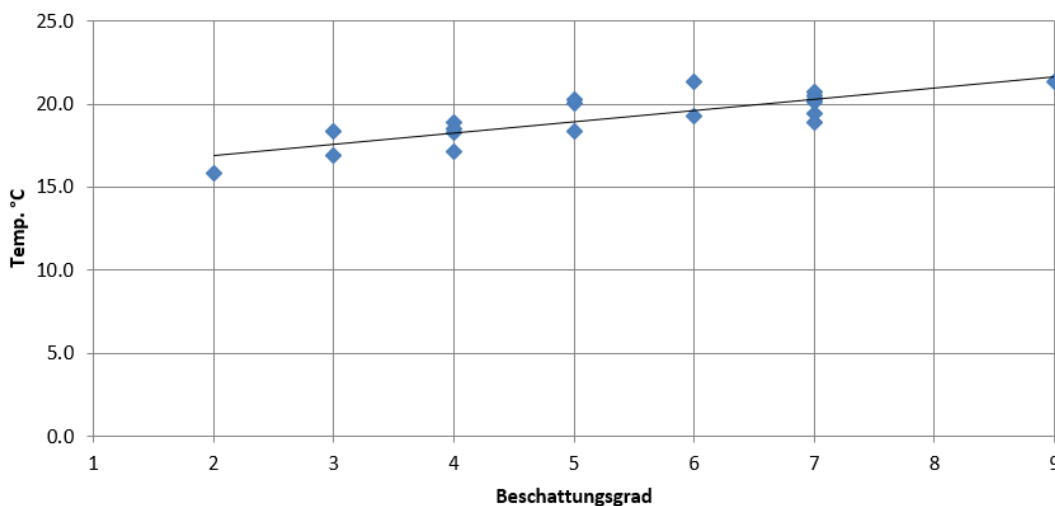


Abbildung 9: Lineare Regression für die gemessene Wassertemperatur des Erusbachs um 16 Uhr (24.7.2019) in Abhängigkeit des Beschattungsgrads beim Messpunkt gemäss Beschattungskarte des Kt. AG (1 = starke Beschattung; 9 = keine Beschattung). Das Bestimmtheitsmass liegt bei 68% und zeigt eine relativ hohe Anpassung der Regression an die Datenpunkte (Signifikanzniveau < 0.05).

### 3.5 Eindolungen

Eindolungen können als extrem beschattete Bereiche aufgefasst werden. Der Austausch der Luft über dem Wasserspiegel mit der warmen Luft ausserhalb der Eindolung ist sehr gering, es herrscht weitestgehend Windstille. Aus diesen Gründen wird die Wassertemperatur bei langen Eindolungen von der Temperatur des angrenzenden Erdreichs dominiert.

Quantifiziert werden konnte die Wirkung einer Eindolung im oberen, landwirtschaftlich geprägten Projektperimeter des Erusbachs (Abbildung 10). In der rund 500m langen Eindolung kühlte sich das Wasser um bis zu  $\Delta T = -3.3^\circ\text{C}$  ab.

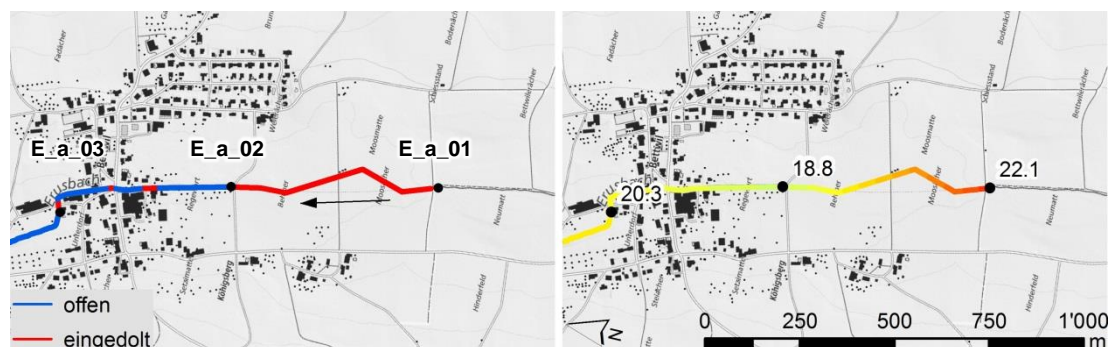


Abbildung 10: Erusbach am 24.7.2019 um 16:00. Linke Abbildung: rot = eingedolt (Temperatur-Angaben in °C).

### 3.6 Einleitungen aus Kläranlagen (ARA)

Einleitungen aus Kläranlagen sind prozessbedingt vergleichsweise warm und können daher zu einer Erwärmung der als Vorfluter dienenden Fliessgewässer beitragen. Wie die Messungen in der Wyna zeigen, lag die Wassertemperatur unterhalb des ARA-Zuflusses im Mittel um knapp  $1^\circ\text{C}$  über den Werten oberhalb. Bei den Maximaltemperaturen kehrt sich das Bild

jedoch um, hier konnten Abnahmen der Wassertemperatur um bis zu  $\Delta T = -2.0^{\circ}\text{C}$  (Wyna am 26.07.2019) nachgewiesen werden.

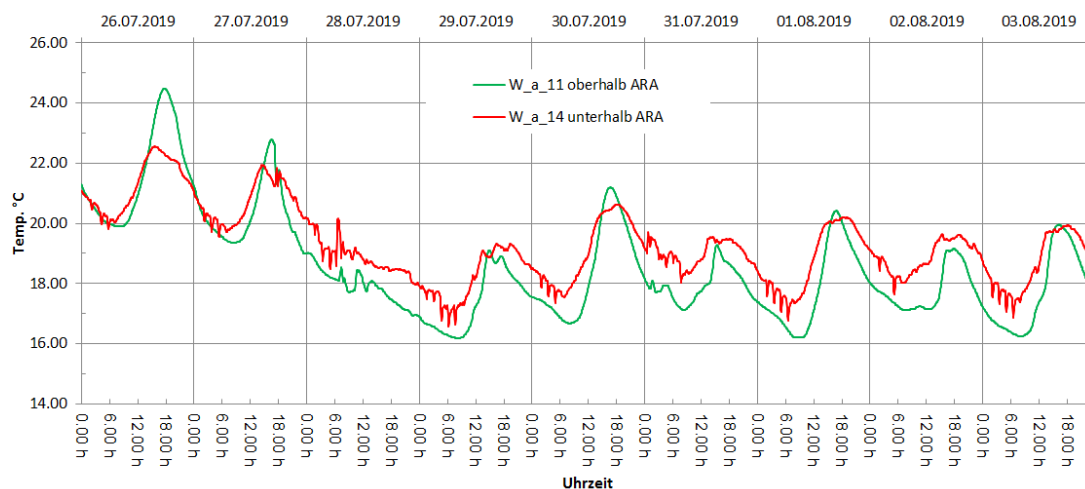


Abbildung 11: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Wyna oberhalb und unterhalb der Kläranlage Reinach.

### 3.7 Seitenbäche

Ob und in welchem Masse ein Seitenbach zu einer Erwärmung oder Abkühlung des Hauptgewässers führt, hängt von seiner Wassertemperatur und seiner Abflussmenge im Vergleich zum Hauptgewässer ab. Insbesondere grössere Seitenbäche können einen wesentlichen Einfluss auf die Wassertemperatur im Hauptgewässer haben, weshalb sie in Projekten zur Entwicklung von Temperaturrefugien nicht ausser Acht gelassen werden dürfen.

Folgendes Beispiel des Erusbachs (Abbildung 12) verdeutlicht den möglichen Einfluss eines weitgehend unbeschatteten Nebengewässers (Mooskanal) auf die Wassertemperatur im Hauptgewässer. Der Moosbach führt hier zu einer deutlichen Temperaturerhöhung im Hauptgewässer um ca.  $\Delta T = +3.0^{\circ}\text{C}$ . Bei den anderen untersuchten Gewässern war der Einfluss der Seitengewässer weniger ausgeprägt. Er lag im Bereich von ca.  $\Delta T = \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ .

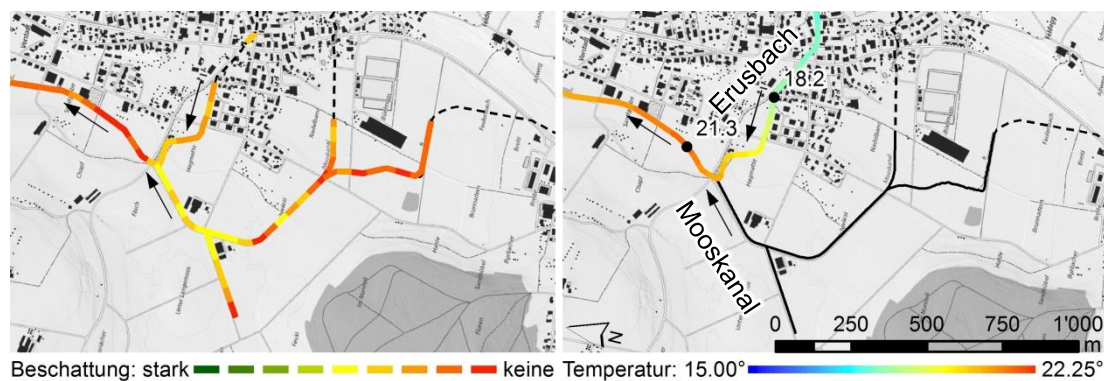


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau und der Wassertemperatur im Erusbach bei Sarmenstorf am 24.7.2019 um 16:00. Der Mooskanal mündet von unten (Pfeil) in den Erusbach.

### 3.8 Grundwasser

Der Einfluss von Grundwasser auf die Wassertemperatur konnte nicht quantitativ untersucht werden, da sich insbesondere die Tiefe der Grundwasserkörper aus Kartenwerken nicht unmittelbar ableiten lassen. Wurden bei der Auswertung der Temperaturmessungen jedoch «Anomalien» festgestellt, z.B. eine Abkühlung trotz fehlender Beschattung, wurde die lokale Grundwasserkarte gesichtet, um allfällige Grundwasserexfiltrationseffekte (Austritt von Grundwasser in das Gewässer) abschätzen zu können.



Für die deutliche Abkühlung des Erusbachs unterhalb von Sarmentorf sind exfiltrierende Grundwasserverhältnisse eine plausible Erklärung, wie die Grundwasserkarte zeigt. Trotz weitgehend fehlender Beschattung auf einer Länge von 1400 m nimmt hier die maximale Wassertemperatur (Messung um 18:00 Uhr) um  $\Delta T = -1.7^\circ\text{C}$  ab.

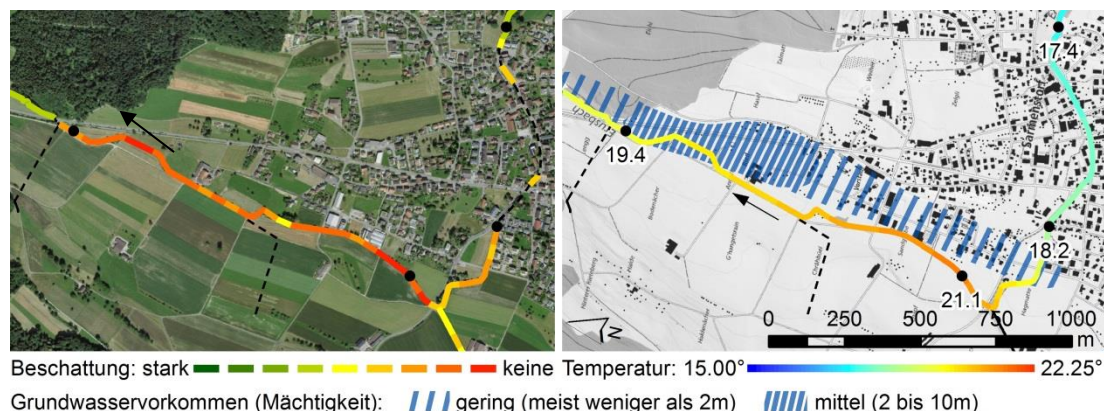


Abbildung 13: Erusbach am 24.7.2019 (18:00) unterhalb der Gemeinde Sarmentorf (Temperatur-Angaben in °C).

### 3.9 Restwasserstrecken und Wasserrückgaben von Ausleitungskraftwerken

Hinsichtlich der Wassertemperatur ist der Einfluss des Wasserkraftwerks Waldhalde bei Hütten besonders auffällig. Auf der 4.5 km langen Restwasserstrecke (km 4.8, Abbildung 2) erwärmt sich die Sihl trotz oft schluchtartigem Verlauf, beidseitiger Bewaldung und einer Lage oberhalb 600 m.ü.M. von 18.9 auf bis zu 23.6°C ( $\Delta T = +4.7^\circ\text{C}$ ; Abbildung 14). Mit der Wasserrückgabe erfolgt eine plötzliche Abkühlung auf 19.8°C ( $\Delta T = -3.8^\circ\text{C}$ ). Der geringe Abfluss in der Restwasserstrecke und die damit verbundene kleine Wassertiefe auf grosser Abflussbreite haben bei starker Sonneneinstrahlung einen deutlichen (erwärmenden) Einfluss auf die Wassertemperatur.

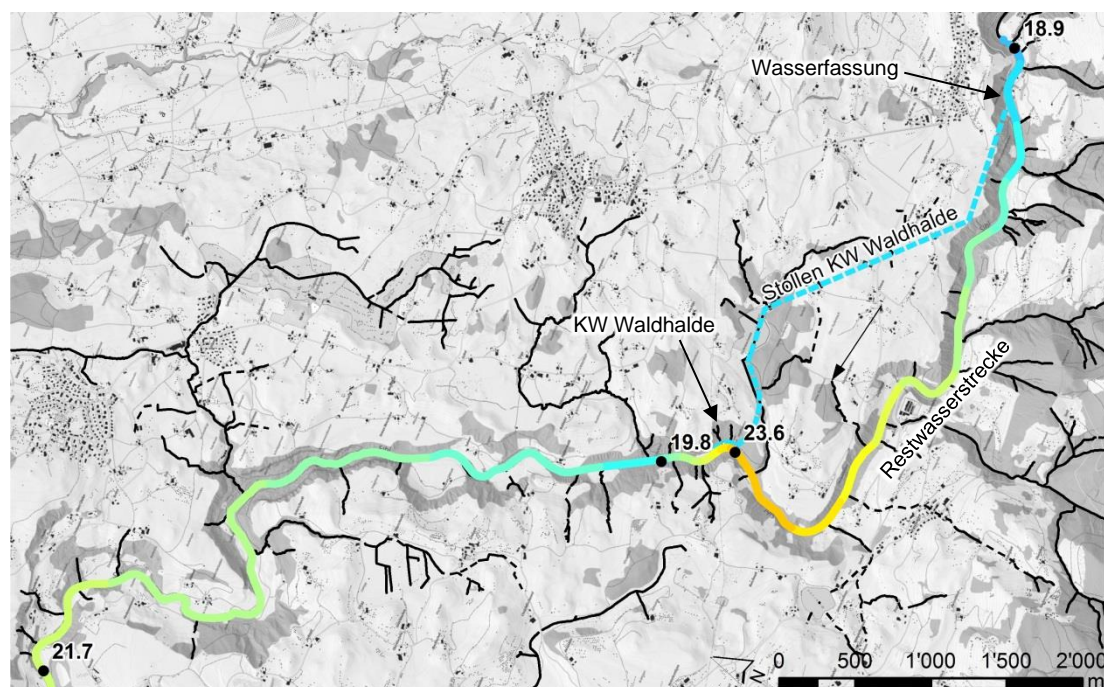


Abbildung 14: Sihl am 9.8.2019 (16:00) auf dem oberen Projektabschnitt zwischen Hütten und Hirzel (Temperatur-Angaben in °C).

### 3.10 Gewässerumfeld: Siedlungsgebiet / Offenland / Wald

Aufgrund des Zusammenwirkens mehrerer Einflussfaktoren ist es kaum möglich, eindeutige Aussagen zum Einfluss des Gewässerumfelds auf die Wassertemperatur zu machen. Einige Messergebnisse deuten aber darauf hin, dass das Gewässerumfeld einen wesentlichen Einfluss haben könnte:

- Die stärkste Temperaturabnahme aller untersuchten Gewässer trat in einem Waldgebiet auf (Erusbach:  $\Delta T = -3.8^\circ\text{C}$  auf 320 m Abschnittslänge, Abbildung 8). Die Abkühlung war hier weit grösser als in stark beschatteten Abschnitten des Offenlands oder in Siedlungsgebieten.
- Bei den maximalen Temperaturen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Offenland und Siedlungsgebiet festgestellt werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die untersuchten Gewässer in Siedlungsgebieten im Unterschied zum Offenland oft eingedolt und somit stark beschattet waren (vgl. auch Kap. 3.5). Dies lässt vermuten, dass sich Gewässer bei gleichem Beschattungsgrad in Siedlungsgebieten stärker erwärmen als im Offenland.

Diese Beobachtungen sind vermutlich auch auf unterschiedliche Lufttemperaturen in den verschiedenen Umfeldern zurückzuführen, die wiederum einen Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Wälder sind durch die Evapotranspiration der Bäume an Hitzetagen unter dem Blätterdach im Schnitt um  $4^\circ\text{C}$  kühler als ihr offenes Umland (WSL 2019), wobei der Unterschied bei alten naturnahen Laubwäldern noch grösser ist. Das Offenland liegt klimatisch in der Regel zwischen Wald und dichtem Siedlungsgebiet. Je «ausgeräumter» die Landschaft ist (d.h. grosse Ackerflächen, wenig Hecken und Feldgehölze etc.), umso mehr ähnelt das Lokalklima demjenigen in dichten Siedlungsgebieten.

### 3.11 Gewässerstruktur

Bei den kleinen und mittleren Fliessgewässern waren die naturnahen Abschnitte nicht selten stärker beschattet als die begradigten. Die Wirkung der Gewässerstruktur auf die Wassertemperatur wurde daher oft überlagert durch den Einflussfaktor Beschattung, was eine klare Aussage zur Wirkung der Gewässerstruktur auf die Wassertemperatur erschwert.

Über die starke Erwärmung der Sihl innerhalb der Restwasserstrecke (Kap. 3.9) können aber Rückschlüsse auf die Wirkung der Struktur gezogen werden. Durch die Ausleitung eines Grossteils des Abflusses sinken in der Restwasserstrecke die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit. Beide Faktoren begünstigen, verstärkt durch die breite Sohle, die Erwärmung. Die Situation ist somit vergleichbar mit derjenigen begradigter Fliessgewässer, die in der Regel durch überbreite Niedrig- und Mittelwasserprofile gekennzeichnet sind. In Hitzeperioden, die meist mit Niedrigwasserabflüssen einhergehen, verteilt sich das wenige Wasser ebenfalls über eine für diesen Abfluss unnatürlich grosse Sohlenbreite und erwärmt sich stark. Ob dieser Effekt ähnlich ausgeprägt ist wie in der Restwasserstrecke der Sihl ( $\Delta T = + 4.7^\circ\text{C}$  auf 4500 m Länge; Kap. 3.9), kann nicht abschliessend beantwortet werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit kann aber von einem bedeutenden Einfluss der Gewässerstruktur auf die Wassertemperatur ausgegangen werden. Stark strukturierte Gewässer mit einer eher schmalen Sohle, resp. einem ausgeprägten Niederwassergerinne erwärmen sich weniger stark. Der Einfluss der Gewässerstruktur gewinnt damit an Bedeutung, je weniger das Gewässer beschattet ist.

### 3.12 Biberdämme

Zur Untersuchung des möglichen Einflusses von Biberbauten auf das Temperaturregime eines Fliessgewässers wurden der Rickebach zwischen Freienwil und Lengnau (AG) und der Tegerbach oberhalb von Siglistorf und unterhalb von Wislikofen (AG) untersucht (Abbildung 1). In beiden Bächen befinden sich Abfolgen von Biberdämmen.

Es wurde ein Temperaturlogger ca. 100m oberhalb des ersten Biberdamms installiert (Ausnahme: Wislikofen). Im Bereich der Biberdämme wurde jeweils ein Logger bei der Stauwurzel

und unmittelbar unterhalb des Biberdamms installiert. Somit wurde immer die Temperatur im Fliessgewässer und nicht diejenige im eingestauten Bibersee gemessen.

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kann kein ursächlicher Zusammenhang zwischen einem Biberdamm und der Wassertemperatur festgestellt werden, d.h. die Wassertemperatur ober- und unterhalb der Dämme war etwa gleich.

## 4 Empfehlungen

### Beschattung

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die grosse Bedeutung der Beschattung für die Wassertemperatur insbesondere kleiner und mittlerer Fliessgewässer. Mit einer mittleren Beschattung (gemäss Beschattungskarte 40 – 60% Beschattung) kann einer weiteren Erwärmung im Allgemeinen vorgebeugt werden, eine mittlere bis starke Beschattung (60 – 100%) bewirkt bei mittlerem bis hohem Ausgangsniveau eine Abkühlung.

Die gemessenen Tageshöchstwerte lagen auf weiten Strecken deutlich über 20°C und überschritten teilweise sogar die Letaltemperatur von Äsche und Bachforelle von 25°C. Eine relativ schnelle Verbesserung dieser heiklen Situation, die sich mit dem Klimawandel weiter verschärfen wird, ist nur mit einer deutlich stärkeren Beschattung zu erreichen. Vor diesem Hintergrund scheint der von Broadmeadow et al. (2010) und Elber et al. (2019) empfohlene Beschattungsgrad von mindestens 80% der Wasserfläche keineswegs übertrieben. Zur Berücksichtigung gegenläufiger Naturschutzinteressen (z.B. Schutz von lichtliebenden Libellenarten oder von Vögeln der offenen Landschaft) kann lokal von dieser Empfehlung abgewichen werden.

Ist eine durchgehende Bestockung eines Gewässers nicht möglich, sollten zumindest die Süd- und Westufer bestockt werden, um einen verstärkten Schattenwurf auf die Wasserfläche zu erreichen. Wie die Untersuchungen zeigen, treten die höchsten Temperaturen am späten Nachmittag auf, wenn die Sonne im Westen steht. Jede weitere Erwärmung kann dann folgenswer sein, daher sollte auch das Westufer bestockt werden. Ist der «Spielraum» für Ufergehölze durch den Hochwasserschutz stark eingeschränkt, sollte zumindest eine hoch aufgeastete Baumreihe entlang der Uferlinie geprüft werden, die den Hochwasserstand nur geringfügig verändert.

Eine Möglichkeit zur Kühlung sehr kleiner Fliessgewässer ist die Etablierung von Hochstaudenfluren, die aufgrund ihres hohen Wuchses eine gute Schattenwirkung haben. Sie sollten darum (zumindest an den Südböschungen) erst ab September gemäht werden sollten.

An grossen Fliessgewässern wie der Sihl kann durch Ufergehölze «nur» eine Teilbeschattung erreicht werden. Es wird empfohlen Bäume, die möglichst grosse, weit ausladende Kronen ausbilden können, direkt an die Uferlinie zu pflanzen.

Wesentliche Voraussetzung zur Erreichung einer ausreichenden Beschattung ist die Förderung der Gewässerunterhaltsdienste in personeller und finanzieller Hinsicht. Dazu gehören auch eine entsprechende Ausbildung und Sensibilisierung für die Thematik. Die Pflege- und Unterhaltsverantwortlichen können mit oft einfachen Mitteln (z.B. Bepflanzung der Uferböschungen, extensiver Unterhalt, Gehölzpflege) eine grosse Wirkung erzielen.

### Gerinneform und -strukturierung

Die Wassererwärmung wird wesentlich durch die Fliessgeschwindigkeit und die Wassertiefe im Verhältnis zur Gerinnebreite beeinflusst. In Hitzeperioden herrscht meist Niederwasserabfluss. Einem ausgeprägten Niederwassergerinne, in dem auch bei geringen Abflüssen vergleichsweise grosse Fliesstiefen und -geschwindigkeiten auftreten, kommt daher auch für die Gewährleistung sommerkühler Wassertemperaturen eine grosse Bedeutung zu.

Die meisten Mittellandgewässer waren ursprünglich mäandrierend und durch ausgeprägte Niederwassergerinne gekennzeichnet. Um diese Verhältnisse wieder zu erreichen, sollte den Gewässern daher wo immer möglich mehr Raum gegeben werden (eigendynamische



Entwicklung oder «klassische» Revitalisierung). Ist dies nicht möglich, kann ein Niederwassergerinne durch Einbauten induziert werden (Abbildung 15). Hierbei ist folgendes zu beachten:

- Überströmte Einbauten sind gegenüber umströmten zu bevorzugen, da sie sich weniger erwärmen (vgl. Abbildung 15 links und rechts)
- Umströmte Einbauten oder Strukturen sollten aus Totholz bestehen und/oder bewachsen sein. Wie Spycher (2020) zeigen konnte, erwärmt sich Wasser im Umfeld von Totholz deutlich weniger als bei Steineinbauten. Durch die Begrünung der Strukturen kann die Temperatur weiter gesenkt werden.
- Das Niederwassergerinne sollte so angelegt werden, dass es über weite Strecken im Schatten verläuft (Sonnengang beachten).

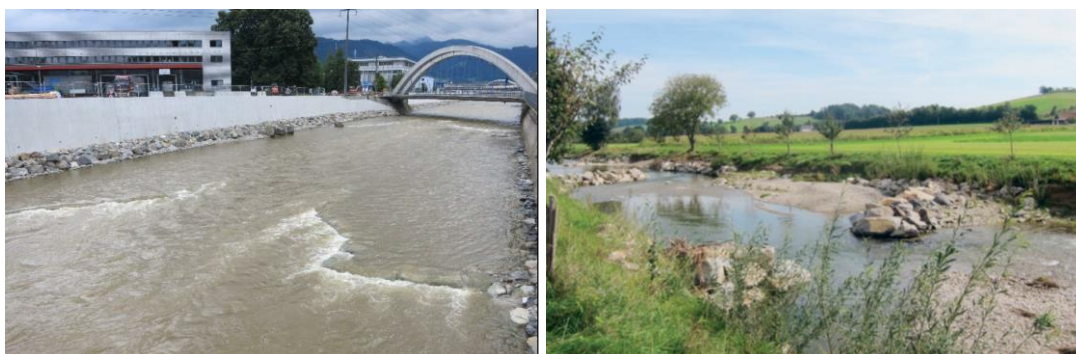


Abbildung 15: Überströmte Lenkbuhnen zur Induzierung eines Niederwassergerinnes in der Kleinen Emme LU (links, Foto: L. Meier). Umströmte Blockbuhnen im Michelbach / Niederösterreich (rechts; Foto: EZB TB Zauner)

Eine naturgemässe Gerinnegestaltung und -strukturierung bedeutet, das Gerinne eng zu halten, was einer Erwärmung entgegenwirkt und zudem die Vernetzung mit dem Grundwasserkörper verbessert und zu mehr Refugien für die aquatische Fauna führt (vgl. Abbildung 16).

**Ausgangszustand:**

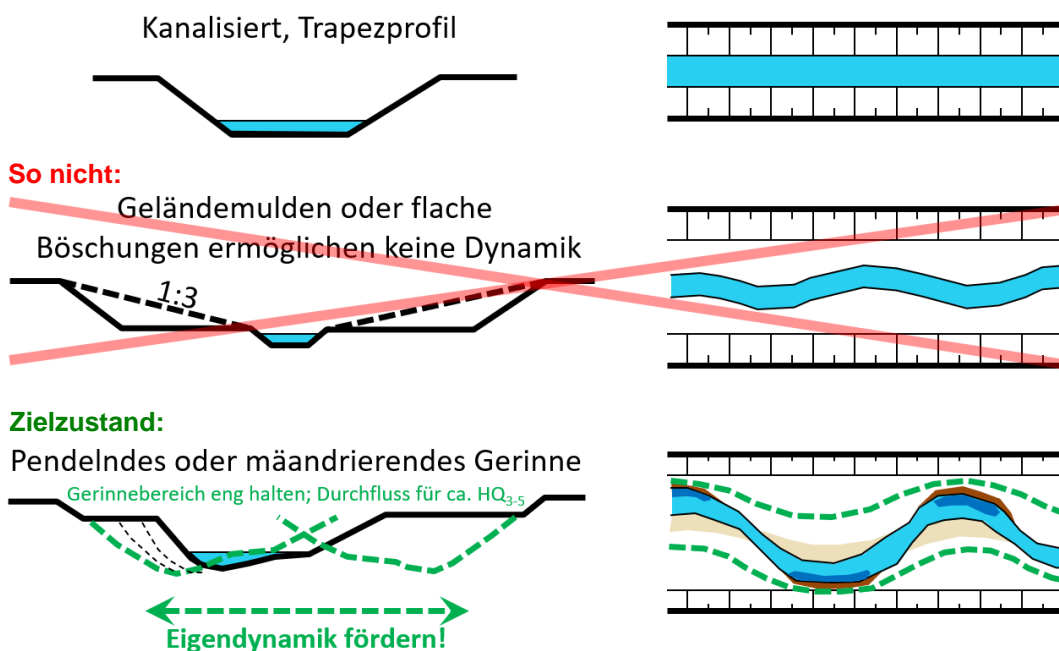


Abbildung 16: Strukturierung eines zu revitalisierenden Fliessgewässers mit natürlicherweise mäandrierender Gerinneform. Flache Böschungen (z.B. 1:3) kommen in der Natur nicht vor und sollten vermieden werden. In Geländemulden mit kleinem Niederwassergerinne können sich bei Hochwasser keine dynamischen Strömungen entwickeln, die zu einer Strukturierung führen würden. Besser ist das

Anlegen eines mäandrierenden, gut strukturierten und eigendynamischen Gerinnes. Das Wasser fliesst konzentriert im eher eng gehaltenen Niederwassergerinne (oder besser «Mittelwassergerinne») mit Prall- und Gleithangstrukturen.

### **Stauhaltungen, Ausleitungen und Restwasserstrecken (Wasserkraftnutzung)**

Jegliche Querbauwerke und Stauhaltungen vergrössern die Wasserspiegelbreite und erhöhen die Aufenthaltszeit des Wassers insbesondere in Niederwasserphasen. Sie führen daher zu einer starken Erwärmung und sollten wo immer möglich zurückgebaut werden. Mit dem Rückbau sind zahlreiche weitere positive Effekte (u.a. Wiederherstellung der freien Fischwanderung, des natürlichen Geschiebetriebes und gewässertypischer Fliessgeschwindigkeiten) verbunden.

Bei Ausleitungen ist in den damit verbundenen Restwasserstrecken ganz besonders auf die Entwicklung eines Niederwassergerinnes zu achten. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob die Restwasserdotations in Kombination mit dem Niederwassergerinne ausreicht, um zumindest die Letaltemperatur von Äsche und Bachforelle von 25°C zuverlässig dauerhaft zu unterschreiten.

### **Massnahmen in der Fläche**

Massnahmen in der Fläche, also im Einzugsgebiet der Fliessgewässer, wirken sich weniger direkt auf die Wassertemperatur aus als die Massnahmen im und am Gewässer. Ihre Umsetzung ist daher aber nicht weniger sinnvoll, da ihr Nutzen sehr vielfältig ist und sich keineswegs nur auf die Fliessgewässertemperatur beschränkt. Es werden folgende Massnahmen empfohlen:

- Kühlende, d.h. verdunstende Landschaftselemente sollten flächendeckend gefördert werden. Dies gilt sowohl für den Wald (z.B. Umwandlung von Nadel- in Laubwald), die offene Landschaft (z.B. Wiedervernässung von Feuchtgebieten, Agroforstsysteme) als auch für Siedlungsgebiete (z.B. Gehölzpflanzungen, Fassaden-/Dachbegrünungen).
- Versiegelte Flächen sollten möglichst entsiegelt und die direkte Ableitung von Niederschlagswasser verhindert werden durch Versickerung oder Speicherung. Die damit verbundene Erhöhung der Bodenfeuchte und lokal auch der Grundwasserstände ermöglicht eine zunehmende Verdunstung durch Pflanzen und damit eine verstärkte Abkühlung.

### **Fazit:**

Eine grossräumig angewandte Kombination der empfohlenen Massnahmen kann die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Fliessgewässer abmildern oder bestenfalls sogar umkehren. Von den Massnahmen profitieren aber nicht nur die Fliessgewässer und ihre Bewohner. Sie führen auch in der Fläche zu einem ausgeglicheneren Lokalklima und Wasserhaushalt, stärken flächendeckend die Biodiversität und bereichern nicht zuletzt das Landschafts- und Ortsbild. Um bereits kurz- bis mittelfristig Verbesserungen hinsichtlich der Wassertemperaturen zu bewirken, eignen sich vor allem die eher kleinräumigen Massnahmen in und an den Fliessgewässern. Mittel- bis langfristig sollten aber auch die Massnahmen in der Fläche umgesetzt werden, um die Auswirkungen des Klimawandels flächendeckend zu dämpfen.

## Dank

An der vorliegenden Arbeit haben mehrere Personen mitgewirkt. Ihnen möchten wir für die fachliche und redaktionelle Unterstützung herzlich danken: Horst Zimmerlein, Aurélie Koch, Pius Niederhauser, Lukas Bammatter, Christian Tesini, Antonia Eisenhut, Thomas Burger, Florian Randegger.

Ein ganz spezieller Dank geht an Urs Riesen, der mit seiner systematischen, sorgfältigen und ausdauernden Arbeit im Feld einen grossen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Zu diesem Bericht existiert eine ausführliche Version, die bei den Autoren bezogen werden kann.

## Literaturverzeichnis

- Broadmeadow, S., Jones, J., Langford, T., Shaw, P., Nisbet, T. (2011): The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. *River Research and Applications*, Jg. 27, 226-237.
- Elber, F., Stäheli, T., Camenzind, M. (2019): Revitalisierung von Fliessgewässern in Zeiten des Klimawandels. *Aqua Viva – Die Zeitschrift für Gewässerschutz*, 03/2019, S. 26 - 31
- Spees, J. (2015). Keeping Rivers Cool – Ribble Rivers Trust. Vortrag beim Burgdorfer Wasserbautag, 16. November 2015
- Spycher, L. (2020): Wasserbauliche Massnahmen hinsichtlich Bestandssteigerung Forellen und Äschen - Einfluss von Baustoffen auf die Wassertemperatur, Auswertung Temperatur-Monitoring am Gäbelbach. Bachelorthesis Frühlingssemester 2020, 68 S.
- Tent, L. (2011): Viel Lebensraum für wenig Geld: Instream Restaurieren. – in: Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Burgdorf / Bau und Wissen, Wildegg (Hrsg.): Burgdorfer Wasserbautag 2011: Aktueller Flussbau – Minimaler Materialeinsatz durch gezielte Nutzung der Strömungskräfte – Instream River Training. Kap. 4, 20 S.
- WSL (2019): Wälder schützen Pflanzen und Tiere vor Klimaerwärmung. Download am 27. Oktober 2020 unter <https://www.wsl.ch/de/newsseiten/2019/04/waelder-schuetzen-pflanzen-und-tiere-vor-klimaerwaermung.html>