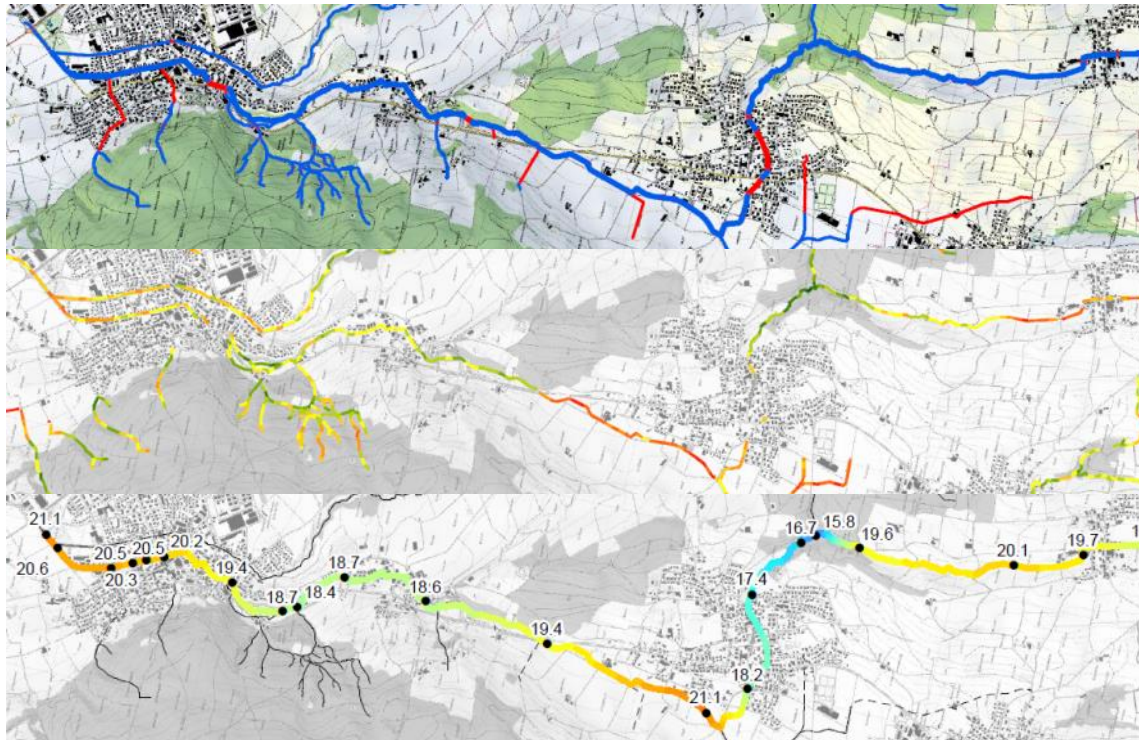


BAFU / Sektion Lebensraum Gewässer
Kanton Zürich / AWEL, Abteilung Gewässerschutz
Renaturierungsfonds Kanton Bern
WWF Schweiz
Kanton Aargau / Jagd und Fischerei
Kanton Zürich / Fischerei- und Jagdverwaltung

Temperaturverlauf in Fließgewässern

Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen,
Ableitung von Massnahmenvorschlägen

7. Dezember 2020



sieber  liechti

Sieber & Liechti GmbH
Limmatauweg 9
5408 Ennetbaden
056 203 40 33

IUB Engineering

IUB Engineering AG
Belpstrasse 48
3000 Bern 14
031 357 11 11

Impressum

Auftraggeber

BAFU / Sektion Lebensraum Gewässer
Kanton Zürich / AWEL, Abteilung Gewässerschutz
Renaturierungsfonds Kanton Bern
WWF Schweiz
Kanton Aargau / Jagd und Fischerei
Kanton Zürich / Fischerei- und Jagdverwaltung

Auftragnehmer

Erstellt: 03.11.2020/Matthias Mende, Pascal Sieber
Geprüft: 16.11.2020/Thomas Burger
Freigegeben: 07.12.2020/Matthias Mende, Pascal Sieber

Auflistung der Änderungen

Version	Datum	Änderungen	Er- stellt	Ge- prüft	Freigege- ben
1.0	29.05.2020	Entwurf	Me, PS		
1.1	03.11.2020	Entwurf	Me, PS	TB	
1.2	07.12.2020	Abgabeverision	Me, PS		

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	7
2	Stand des Wissens	9
2.1	Definition naturnahes Temperaturregime	9
2.2	Beschattung durch Ufergehölze und Auwald	10
2.2.1	Physikalische Grundlagen	10
2.2.2	Wirkung auf die Wassertemperatur	11
2.3	Gewässerstruktur: Förderung ausreichender Fließgeschwindigkeiten und Fliesstiefen	13
2.4	Massnahmen in der Fläche	15
3	Fragestellung der Untersuchung	17
4	Methodik	18
4.1	Untersuchungsgebiete	18
4.2	Eingesetzte Messinstrumente	19
4.2.1	Datenlogger <i>HOBO® Water Temp Pro v2</i>	19
4.2.2	Prüfung der Logger	20
4.3	Vorgehen, Ablauf der Messungen	20
4.3.1	Installation der Logger	20
4.3.2	Testmessungen	21
4.3.3	Messungen an den Fließgewässern	24
5	Ergebnisse	25
5.1	Thermische Charakteristika der untersuchten Gewässer	25
5.1.1	Jonen	26
5.1.2	Sihl	26
5.1.3	Wyna	27
5.1.4	Erusbach	27
5.2	Tagesverlauf der Wassertemperatur	28
5.3	Temperaturdrift	28
5.4	Einflussfaktoren	29
5.4.1	Beschattung (fehlende / starke)	29
5.4.2	Eindolungen	33
5.4.3	Zuflüsse	35
5.4.3.1	Einleitungen aus Kläranlagen (ARA)	35
5.4.3.2	Seitenbäche	36
5.4.3.3	Grundwasser	36
5.4.3.4	Wasserrückgaben von Ausleitungskraftwerken	37
5.4.4	Gewässerumfeld: Siedlungsgebiet / Offenland / Wald	38
5.4.5	Gewässerstruktur	38
5.4.5.1	Naturnah vs. begradigt	38
5.4.6	Biberdämme	38
5.5	Fazit	42
6	Empfehlungen	45

Anhang:

- Einzugsgebiets-Charakteristika der untersuchten Fließgewässer Jonen, Erusbach, Wyna und Sihl
- Temperaturverlauf im Tagesverlauf in 2-Stunden-Schritten für die untersuchten Fließgewässer Jonen, Erusbach, Wyna und Sihl

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1:	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Häufigkeit aquatischer Wirbelloser in Abhängigkeit von der Zunahme der Wassertemperatur in Flüssen (Quelle: Durance & Ormerod 2007)	7
Abbildung 2:	Entwicklung der Forellenfänge (links; Bachforelle dunkelblau) und Äschenfänge (rechts) in der Schweiz von 2000 bis 2018 (Fangertrag total (Anzahl), alle Gewässertypen, ganze Schweiz; Quelle BAFU – Sektion Lebensraum Gewässer, 2020; www.fischereistatistik.ch)	7
Abbildung 3:	Temperaturzielkurve für den guten ökologischen Zustand eines Mittelgebirgsgewässers der Äschenregion (Hyporhithral) (Hoffmann (2011), zitiert in Wupperverband (2011))	10
Abbildung 4:	Umwandlung der Sonnenstrahlung – Vergleich eines entwässerten Ackers mit einem Laubwald (Quelle: Rippl 2012, mod.)	11
Abbildung 5:	Modellierte Wassertemperaturen in Abhängigkeit vom Vegetationstyp (Quelle: Roth et al. 2010)	12
Abbildung 6:	Temperaturverläufe in Kolken eines offenen und beschatteten Gewässerabschnitts in Südengland (Quelle: Broadmeadow et al. 2010, zitiert in https://www.forestry.gov.uk)	13
Abbildung 7:	Natürlicher Abschnitt des Dindlikerbachs / Humlikon mit ausgeprägtem Niederwassergerinne (Foto: P. Sieber)	14
Abbildung 8:	Ausgebaute Wiese in Lörrach mit Doppeltrapezprofil, regelmässigen Schwellen und verflachter Sohle (Fotos: M. Mende)	14
Abbildung 9:	Enziwigger in Willisau links 2009 vor Massnahmen und rechts 2013 nach dem Einbau von Blöcken und Faschinen. Zusammen mit dem randlichen Bewuchs hat sich eine grössere Strömungsvielfalt und ein konzentrierterer Abfluss eingestellt (Fotos: Kanton Zürich, vif, Abteilung Naturgefahren)	15
Abbildung 10:	Versickerungssysteme. Links: Mulden-Rigolensystem im Siedlungsgebiet (Quelle: Wikipedia); rechts: Hangparallele Geländemulde im Landwirtschaftsgebiet (Fotos: Michal Kravcik)	15
Abbildung 11:	Übersicht der untersuchten Fließgewässerstrecken mit Standorten der Abflussmessstationen und der Temperatur-Messstationen (Luft). Im Anhang befindet sich für jedes Gewässer ein Kartenblatt mit den Datenlogger-Standorten (Quelle: swisstopo).	19
Abbildung 12:	Eingesetzter Datenlogger <i>HOBO® Water Temp Pro v2</i> (Abbildung ca. in Originalgrösse)	20
Abbildung 13:	Am Metallstab befestigter Datenlogger mit Sonnenabdeckung.	21
Abbildung 14:	Messdispositiv Test A: Wirksamkeit einer Sonnenabdeckung	21
Abbildung 15:	Messresultat des Tests A zur Untersuchung der Wirksamkeit einer Sonnenabdeckung am Beispiel der Jonen beim Flugplatz Hausen am 21.6.2019.22	
Abbildung 16:	Messdispositiv Test B: Einfluss des Durchmischungsverhaltens zweier zusammenfliessender Gewässer (Jonen und Heischer Dorfbach in der Gemeinde Hausen am Albis).	23
Abbildung 17:	Messresultat des Tests B zur Untersuchung des Durchmischungsverhaltens am Beispiel der Jonen beim Zusammenfluss mit dem Heischer Dorfbach am 27.6.2019. Es herrschten Niedrigwasserabflussbedingungen.	23
Abbildung 18:	Lufttemperatur der MeteoSchweiz-Messstationen Mosen, Cham und Wädenswil. Die Standorte der Messstationen sind auf der Übersichtskarte in Abbildung 11 eingezeichnet. Die Messperioden der untersuchten Fließgewässer sind als schwarze Pfeile dargestellt. Die ausgewählten Tage für die Darstellungen der	

	Temperaturverläufe (Anhang) sind als blaue Punkte mit dem Anfangsbuchstaben des jeweiligen Gewässers bezeichnet.	24
Abbildung 19:	Temperatur-Längenprofile für Erusbach, Sihl, Jonen und Wyna jeweils um 8:00 und 18:00 Uhr (primäre Y-Achse; Messungen nicht am gleichen Datum!). 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.	25
Abbildung 20:	Temperaturverlauf in der Jonen am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fließrichtung: blauer Pfeil (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang). Der Zufluss der Jonen ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet.	26
Abbildung 21:	Temperaturverlauf in der Sihl am 9. August 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; blauer Pfeil: Fließrichtung; roter Pfeil: Wasserrückgabe des Kraftwerks Waldhalde (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).	26
Abbildung 22:	Temperaturverlauf in der Wyna am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fließrichtung: blauer Pfeil (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).	27
Abbildung 23:	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 (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).	27
Abbildung 24:	Messreihe der Jonen (resp. Mülibach: Messpunkte J_a_01 – J_a_03) am Beispiel der obersten 5 Messpunkte. Für weitere Erläuterungen zu den Temperaturkurven siehe Kap. 5.4.1 und 5.4.3.1.	28
Abbildung 25:	Temperatur-Längenprofil der Sihl am 9. August 2019 zwischen 15 und 23 Uhr. Die Erwärmung auf den obersten 5 km ist auf die Restwasserstrecke im Bereich des Kraftwerks Waldhalde zurückzuführen (vgl. auch Kap. 5.4.3.4). Zwischen km 22 und 28 findet ein Wärmetransport statt. Stunden mit starker Sonneneinstrahlung (Wassererwärmung möglich) sind in rot-Tönen dargestellt, Stunden mit geringer oder ohne Sonneneinstrahlung sind in blau-Tönen dargestellt. Die Temperaturanomalie bei km 29 (gelber Pfeil) ist begründet durch die Einleitung von kühlerem Klärwasser aus der Kläranlage Adliswil.	29
Abbildung 26:	Mülibach im Bereich der Messpunkte J_a_01 bis J_a_03. Der Kanal ist nur sehr spärlich beschattet (Quelle: GIS-ZH).	30
Abbildung 27:	Mülibach (resp. Jonen ab Messpunkt J_a_04) am 26.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).	30
Abbildung 28:	Zeitlicher Temperaturverlauf im Mülibach (ab Messpunkt J_a_04: Jonen) an den Messpunkten J_a_01 bis J_a_03.	30
Abbildung 29:	Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur in der Wyna bei Gontenschwil (rechts) am 26.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C). Starke Beschattung = 100%, keine Beschattung = 0%.	31
Abbildung 30:	Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur im Erusbach (rechts) zwischen Bettwil und Sarmenstorf am 24.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).	31
Abbildung 31:	Zeitlicher Temperaturverlauf im Erusbach an den Messpunkten E_a_04 bis E_a_06	32
Abbildung 32:	Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur in der Wyna (rechts) bei Gontenschwil und Oberkulm am 26.7.2019 um 18:00 (Temperatur-Angaben in °C).	32
Abbildung 33:	Jonen am 26.7.2019 um 16:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).	32
Abbildung 34:	Lineare Regression für die gemessene Wassertemperatur des Erusbach um 16 Uhr 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).	33
Abbildung 35:	Erusbach am 24.7.2019 um 16:00. Linke Abbildung: rot = eingedolt (Temperatur-Angaben in °C).	34

Abbildung 36:	Zeitlicher Temperaturverlauf im Erusbach ober- und unterhalb der 500m langen Eindolung oberhalb von Bettwil.	34
Abbildung 37:	Erusbach am 24.7.2019 (18:00 Uhr) in Sarmenstorf (Temperatur-Angaben in °C).	34
Abbildung 38:	Wyna am 26.7.2019 (18:00 Uhr) in Menziken / Reinach (Temperatur-Angaben in °C).	35
Abbildung 39:	Zeitlicher Temperaturverlauf in der Wyna oberhalb und unterhalb der Kläranlage Reinach.	35
Abbildung 40:	Zeitlicher Temperaturverlauf in der Jonen oberhalb und unterhalb der Kläranlage Hausen.	35
Abbildung 41:	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. Die Messung 18.2°C entspricht dem Messpunkt E_a_09, die Messung 21.3°C dem Messpunkt E_a_11.	36
Abbildung 42:	Erusbach vor (E_a_09) und nach (E_a_11) dem Zusammenfluss mit dem Moosbach.	36
Abbildung 43:	Erusbach am 24.7.2019 (18:00) unterhalb der Gemeinde Sarmenstorf (Temperatur-Angaben in °C).	37
Abbildung 44:	Sihl am 9.8.2019 (16:00 Uhr) auf dem oberen Projektabschnitt zwischen Hütten und Hirzel (Temperatur-Angaben in °C).	37
Abbildung 45:	Übersicht der Mess-Standorte am Rickebach und am Tegerbach (Quelle: swisstopo).	39
Abbildung 46:	Rickebach mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).	40
Abbildung 47:	Temperaturverlauf im Rickebach im Bereich der Biberdämme. Die rote Datenkurve entspricht der Messstation Lägern (Lufttemperatur).	40
Abbildung 48:	Tegerbach oberhalb von Siglistorf mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).	41
Abbildung 49:	Tegerbach unterhalb von Wislikofen mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).	41
Abbildung 50:	Temperaturverlauf im Tegerbach im Bereich der Biberdämme (Datenlogger T_a_01 - T_a_05: Standorte oberhalb von Siglistorf; Datenlogger T_a_06 / T_a_07 Standorte unterhalb von Wislikofen).	42
Abbildung 51:	Überströmte Lenkbuhnen zur Induzierung eines Niederwassergerinnes in der Kleinen Emme LU (links; Foto: L. Meier). Umströmte Blockbuhnen in der Tulln / Niederösterreich (rechts; Foto: EZB TB Zauner)	46
Abbildung 52:	Strukturierung eines zu revitalisierenden Fließgewässers mit natürlicherweise mäandrierender Gerinneform. Das alte Trapezprofil wird innerhalb des neuen, breiteren Gewässerraums in ein mäandrierendes, gut strukturiertes und eigendynamisches Gerinne umgewandelt. Das Wasser fließt konzentriert im eher engen Niederwassergerinne ab.	46

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. Unter anderem ist sie relevant für die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaften, die Photosyntheseleistung, gewässerinterne Stoffumsatzraten und damit den Sauerstoffbedarf, die Löslichkeit von Gasen (z.B. Sauerstoff) oder die Toxizität zahlreicher Umweltchemikalien (LfU Bayern 2013).

Besonders von Änderungen der Wassertemperatur betroffen sind die Wirbellosen (Abbildung 1) und die Fische, bei letztgenannten vor allem die typischen Arten der Bäche und kleinen Flüsse (Salmonidenregion) wie z.B. die Bachforelle und die Äsche. Die Bestände dieser auf sommerkühle Fließgewässer angewiesenen Arten sind bereits heute durch Lebensraumverluste, Fischwanderhindernisse oder Schadstoffeinträge unter Druck (Abbildung 2) und werden durch den Klimawandel und den damit verbundenen Wassertemperaturanstieg weiter geschwächt. Je nach eintretendem Klimaszenario ist damit zu rechnen, dass z.B. die Bachforelle in den nächsten 30 Jahren im Schweizer Mittelland aussterben wird (Notter 2009). Gleiches gilt in verschärfter Form für die Äsche, die im Allgemeinen grössere Gewässer als die Bachforelle besiedelt. Bei steigenden Temperaturen kann sie daher ihren Lebensraum weniger in die höher gelegenen Bachoberläufe und damit kühlere Abschnitte verschieben.

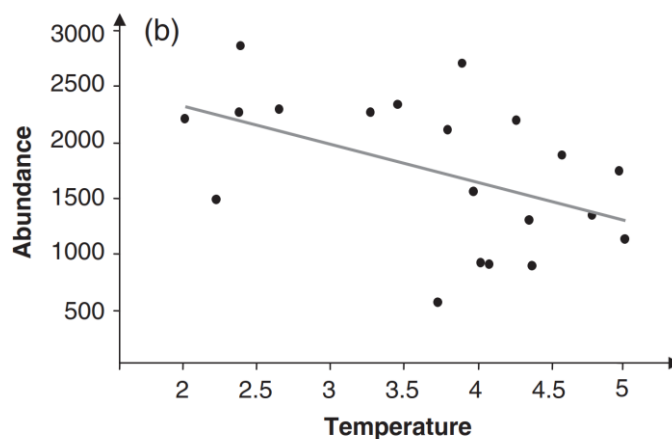


Abbildung 1: Häufigkeit aquatischer Wirbelloser in Abhängigkeit von der Zunahme der Wassertemperatur in Flüssen (Quelle: Durance & Ormerod 2007)

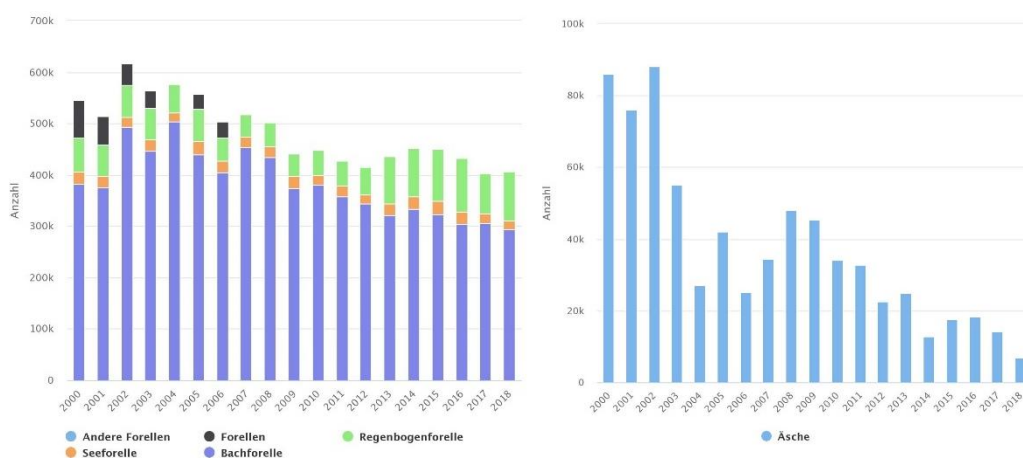


Abbildung 2: Entwicklung der Forellenfänge (links; Bachforelle dunkelblau) und Äschenfänge (rechts) in der Schweiz von 2000 bis 2018 (Fangertrag total (Anzahl), alle Gewässertypen, ganze Schweiz; Quelle: BAFU – Sektion Lebensraum Gewässer, 2020; www.fischereistatistik.ch)

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). Problematisch sind aber nicht nur die hohen Temperaturen allein, sondern auch im Jahres- und insbesondere im Tagesverlauf stark schwankende Wassertemperaturen, da viele gewässertypische Arten der Bäche und kleinen Flüsse auf relativ konstante Temperaturen angewiesen sind. Neben diesen direkten Auswirkungen der Wassertemperatur auf die Fische wird auch der Ausbruch von Krankheiten durch die Wassertemperatur beeinflusst. So liegt die Grenze für die oft tödlich verlaufende proliferative Nierenkrankheit (PKD) bei Bachforellen bei 15°C.

Die Gründe für die bereits heute meist unnatürlich hohen Wassertemperaturen sind vielfältig und keineswegs nur auf den Klimawandel zurück zu führen. Zu nennen sind unter anderem

- die oft fehlende oder unzureichende Beschattung der Gewässer durch standorttypische Ufergehölze oder Auwälder.
- die meist überbreiten Niedrig- und Mittelwasserprofile unserer oft begradigten Bäche und Flüsse. Sie führen zu einer verflachten Sohle mit geringer Fliesstiefe und -geschwindigkeit, was die Erwärmung begünstigt.
- die grossflächige künstliche Entwässerung der Böden (z.B. durch Versiegelung, Drainagen und Entwässerungsgräben) und die damit verbundene Absenkung der Grundwasserspiegel, die die Ausprägung und Dauer von Niedrigwasserperioden, in denen sich das wenige Wasser schnell erwärmt, wesentlich verschärft. Zusätzlich sinken mit dem Grundwasserspiegel auch die Verdunstungsfähigkeit der Landschaft und die damit verbundenen Kühleffekte (Ripl 2012).
- der grossflächige Aufbau oft standortfremder Nadelbaumforste anstelle von naturnahen Laubwäldern. Generell erwärmen sich Nadelbaumforste deutlich stärker als Laubwälder. So konnten z.B. beim Vergleich der Tageshöchstwerte in alten Buchenwäldern mit denen in Kiefernforsten (in Deutschland) Temperaturunterschiede von über 10°C (!) festgestellt werden (NABU 2020).

Der Klimawandel verstärkt diese Prozesse, da er neben einer Erhöhung der Temperatur zu einer weiteren Verschärfung der Niedrigwassersituationen führt. Für viele typische Bewohner der Bäche und kleinen Flüsse aber auch der grösseren Gewässer werden die Überlebensbedingungen damit zunehmend schlechter. Ehemals häufige Arten wie die Bachforelle oder die Äsche werden daher ohne wirkungsvolle Gegenmassnahmen aus grossen Teilen der Schweiz verschwinden (s.o.), bei anderen ist der Erfolg aufwändiger Wiederansiedlungsprojekte (z.B. des Atlantischen Lachs) in Frage gestellt.

Aus diesen Betrachtungen heraus stellen sich die Fragen, mit welchen Massnahmen der Erwärmung unserer Fliessgewässer entgegengewirkt werden kann und wie wirkungsvoll diese Massnahmen sind.

Das **Ziel** der vorliegenden Arbeit ist es, das vorhandene Wissen zur Beantwortung dieser Fragen soweit vorhanden praxistauglich aufzubereiten und die Zusammenhänge durch eine bildgebende Auswertung eigener Messresultate darzustellen und zu ergänzen. Auf diese Weise soll eine breite Fachwelt aus Planern, Entscheidungsträgern und Praktikern angesprochen und das Bewusstsein für Temperaturprozesse in Fliessgewässern und für die Wirkung von Massnahmen zur Abkühlung in breiten Kreisen 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 Stand des Wissens

Massnahmen zu Erreichung eines naturnahen Temperaturregimes

2.1 Definition naturnahes Temperaturregime

Ein natürliches bzw. naturnahes Temperaturregime beschreibt den jahreszeitlichen Temperaturverlauf in einem vom Menschen weitgehend unbeeinflussten oder nur wenig beeinflussten Fließgewässer (inkl. seines natürlichen bzw. naturnahen Einzugsgebiets).

Kleine und mittlere Fließgewässer sind natürlicherweise meist quell- und mit zunehmender Grösse vor allem grundwasserbeeinflusst. Sie stehen vielfach in einem intensiven Austausch mit dem Grundwasser, der heute jedoch durch Kolmationserscheinungen (z.B. in Stauhaltungen) und Grundwasserabsenkungen oft nur noch eingeschränkt gegeben ist. Grund- und Quellwasser weisen über das Jahr meist eine recht konstante Temperatur auf. Im Schweizer Mittelland schwankt sie zwischen 7 – 10°C (Gründler & Mende 2020) und damit weit weniger als die Lufttemperatur. Die meisten Fließgewässer sind daher im Vergleich zur Lufttemperatur natürlicherweise als «sommerkühl und winterwarm» einzustufen.

Temperaturschwankungen treten bei kleinen und mittleren Fließgewässern natürlicherweise nur sehr gedämpft auf. Diese Dämpfung wird neben dem zufließenden kühlen Grund- und Quellwasser durch Kühlungseffekte des umgebenden Bewuchses (z.B. Auenwald, Kap. 2.2) verstärkt.

Eine weitere Dämpfung der Temperaturschwankungen ergibt sich in natürlichen und naturnahen Einzugsgebieten durch das i.A. grosse Wasserretentionsvermögen der Landschaft. Natürliche Retentionsflächen wie Feuchtgebiete (Moore, Auen, Sümpfe), Geländemulden, Wälder etc. können grosse Niederschlagsmengen zurückhalten und stark zeitverzögert an das Grundwasser und die Fließgewässer weitergeben. Der Basisabfluss ist daher in natürlichen Landschaften meist wesentlich grösser als in den heute oft stark entwässerten (z.B. durch Drainagen, Entwässerungsgräben) und teilweise versiegelten Landschaften. Letztgenannte sind oft durch ausgeprägte, langanhaltende Niedrigwasserabflüsse und starke Hochwasserspitzen gekennzeichnet. Da sich grössere Abflüsse langsamer erwärmen als kleinere, trägt auch der erhöhte Basisabfluss natürlicher Landschaften wesentlich zu einer Dämpfung der Wassertemperaturschwankungen bei.

Fazit: In natürlichen und naturnahen Einzugsgebieten kleiner und mittlerer Fließgewässer wirken mehrere Dämpfungsprozesse zusammen. Ihr Temperaturregime ist daher sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf durch geringe Temperaturschwankungen gekennzeichnet. Die Temperaturschwankungen nehmen mit der Gewässergrösse zu, wären aber natürlicherweise weit weniger ausgeprägt als in den heute meist intensiv genutzten und entwässerten Landschaften. Eine genaue Quantifizierung der Dämpfungswirkung in natürlichen und naturnahen Gewässersystemen ist schwierig. Die Vielzahl der zusammenwirkenden Dämpfungsmechanismen, auf die in den folgenden Unterkapiteln genauer eingegangen wird, lässt aber vermuten, dass die Wassertemperaturen in den hier betrachteten kleinen Bächen und kleinen Flüssen (Kennzeichen Kronenschluss) auch in Zeiten des Klimawandels nicht wesentlich ausserhalb des Optimalbereichs der Äschenregion (Abbildung 3) liegen würden.

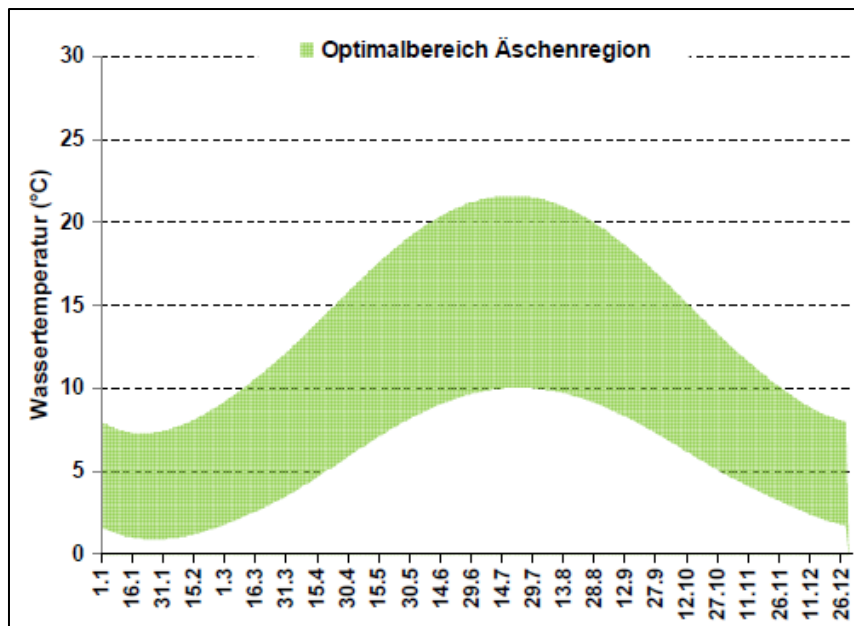


Abbildung 3: Temperaturzielkurve für den guten ökologischen Zustand eines Mittelgebirgsgewässers der Äschenregion (Hyporhithral) (Hoffmann (2011), zitiert in Wupperverband (2011))

2.2 Beschattung durch Ufergehölze und Auwald

= Massnahmen am Gewässer (Ufer)

2.2.1 Physikalische Grundlagen

Die Sonnenstrahlung setzt sich aus dem sichtbaren Licht, der ultravioletten und der infraroten Strahlung zusammen. In der Schweiz beträgt die maximale, aus der Sonnenstrahlung resultierende Leistung etwa 800 - 1'000 W/m². Trifft diese Strahlungsenergie auf Materie (z.B. Luft, Erdoberfläche), wird sie umgewandelt und zu meist kleineren Teilen zurückgestrahlt. Bei auf weitgehend trockene Oberflächen (z.B. städtische Bereiche, entwässerte Äcker) treffender Sonnenstrahlung entsteht hierbei vor allem Wärme (Abbildung 4). In Landschaften mit guter Wasserversorgung (z.B. Wald, Schilfbestände) führt diese Energie hingegen zu einer verstärkten Evapotranspiration, also Verdunstung durch Pflanzen sowie von Boden- und Wasseroberflächen, wodurch der Umgebung Energie entzogen wird. Die Verdunstung von z.B. einem Liter je Quadratmeter (1 mm Wassersäule) bewirkt einen Energieentzug von ca. 2'500 kJ/m², der zu einem späteren Zeitpunkt und an anderer Stelle bei der Kondensation des entstandenen Wasserdampfs wieder freigesetzt wird (z.B. durch Niederschlag oder Taubildung). Verdunstet genannter Liter je Quadratmeter an sehr heissen Tagen z.B. innerhalb einer Stunde, entspricht dies umgerechnet einem Energieentzug von 694 Wh/m². D.h. der Grossteil der Energie aus der Sonnenstrahlung wird in "Verdunstungskälte" umgewandelt, die Erwärmung der Landschaft ist entsprechend gering. Grundlegende Voraussetzung dafür, dass dieser kühlende Effekt auftreten kann, ist selbstverständlich eine ausreichende Wasserverfügbarkeit, die jedoch insbesondere in entwässerten Landschaften zeitweise nicht gegeben ist.

Besonders ausgeprägt ist die Evapotranspiration und die damit verbundene kühlende Wirkung in baumbewachsenen Landschaften, da die verdunstende Blattoberfläche hier mitunter ein Vielfaches der Bodenoberfläche ausmacht. Die Verringerung der Wassertemperatur eines Fließgewässers durch einen ufernahen Gehölzsaum oder Auwald ist somit nicht nur auf die Beschattung des Gewässers und dadurch verringerten Energieeintrag, sondern ganz wesentlich auch auf die mit den Gehölzen verbundene Evapotranspiration zurückzuführen. Verstärkt wird die kühlende Wirkung der Evapotranspiration durch das als Isolationsschicht wirkende Blätterdach, das einen Austausch mit der wärmeren Umgebungsluft mindert. Im Schnitt liegen die sommerlichen Höchsttemperaturen daher im Wald um 4°C tiefer als ausserhalb davon! Im Winter und in der Nacht kehrt sich dieses Muster um, und die Waldtemperaturen sind im Durchschnitt um 1 Grad höher (WSL 2019).

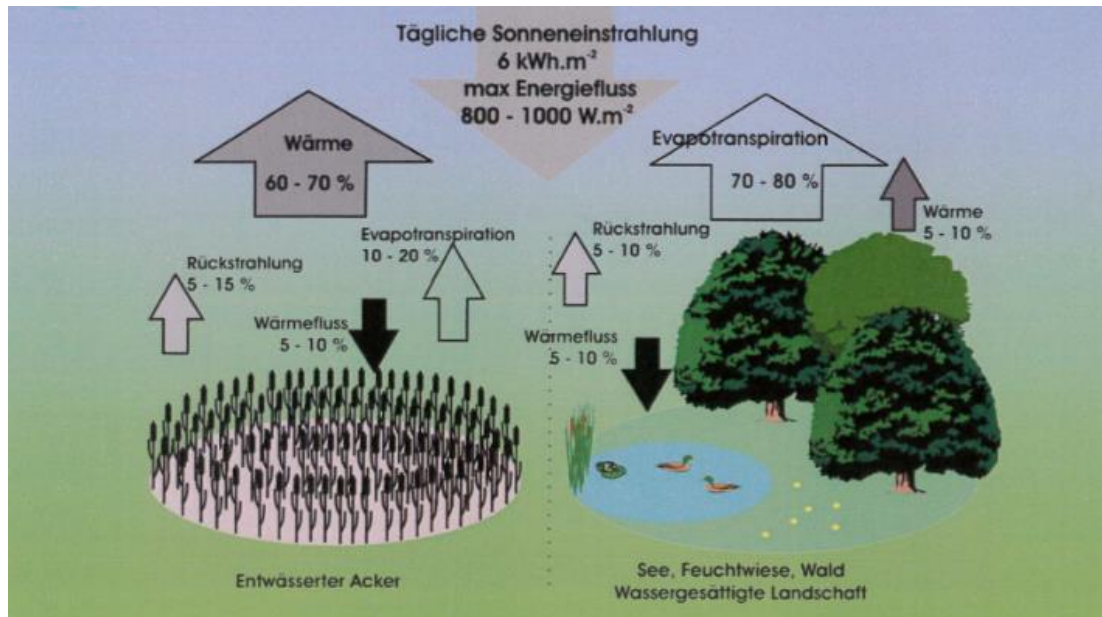


Abbildung 4: Umwandlung der Sonnenstrahlung – Vergleich eines entwässerten Ackers mit einem Laubwald (Quelle: Rippl 2012, mod.)

2.2.2 Wirkung auf die Wassertemperatur

Ufervegetation wirkt sich in vielerlei Hinsicht positiv auf Fließgewässer aus. Neben dem Kühlungseffekt, um den es im Folgenden schwerpunktmässig gehen wird, soll an dieser Stelle auch auf den Schadstoff-; Feinsediment- und Nährstoffrückhalt, die landschaftsästhetische Wirkung, den Totholz- und Laubeintrag und die vielfältigen Habitatfunktionen hingewiesen werden.

Ufergehölze und (Au-)Wälder, bei sehr kleinen Gewässern auch ufernahe Hochstaudenfluren, wirken sich in zweierlei Hinsicht positiv auf das Temperaturregime eines Fließgewässers aus:

1. Sie verringern die maximale, im Tagesverlauf auftretende Wassertemperatur. Dies ist besonders an heißen Tagen von Bedeutung, wenn für die Gewässerorganismen schädliche oder gar tödliche Temperaturen auftreten können.
2. Sie dämpfen die Temperaturschwankungen im Tages- und im Jahresverlauf.

Beide Wirkungen reduzieren den thermischen Stress der gewässertypischen Lebensgemeinschaften und sind damit grundlegende Voraussetzung für ein intaktes Ökosystem.

Die Kühl- bzw. Dämpfungswirkung der Ufervegetation beruht auf der lokalen Beeinflussung der Faktoren Wind, Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung (Pusey & Arthington 2003). Das Gewässer wird quasi «wärmedämmt», und somit werden grosse Temperaturschwankungen verhindert. Die Verringerung der auf das Gewässer treffenden Sonneneinstrahlung verringert zudem die Wärmebelastung (Gregory et al. 1991). Bei kleinen Bächen kann geschlossener Wald die auf die Wasseroberfläche treffende Strahlung um 97-99% reduzieren (Naimann & Sedell 1980). Zudem erhöht die Evapotranspiration der umgebenden Vegetation den Wassergehalt in der Luft und trägt zum kühlen Mikroklima bei (Johnson 2004). Die Stärke der Evapotranspiration und damit der Abkühlung ist wiederum abhängig von den Pflanzenarten und der Pflanzendichte (Moore et al. 2005).

Ausgehend von den oben beschriebenen Mechanismen, mit denen die Ufervegetation die Wassertemperatur beeinflusst, sind folgende Parameter für den Erfolg der Temperaturregulierung besonders bedeutend (Gregory et al. 1991, Osborne and Kovacic 1993):

- Höhe und Dichte der Ufervegetation
- Abstand der Ufervegetation zum Fließgewässer
- Ausrichtung der Ufervegetation zum Sonnenstand (geografische Lage).

Den Einfluss von Vegetationstypen auf die Wassertemperatur zeigen die Modellierungsergebnisse von Roth et al. (2010; Abbildung 5). Je grösser die Pflanzendecke, umso geringer sind die täglichen Unterschiede zwischen der maximalen und minimalen Wassertemperatur. Die stärkste Temperaturdämpfung lässt sich somit mit Wald erzielen.

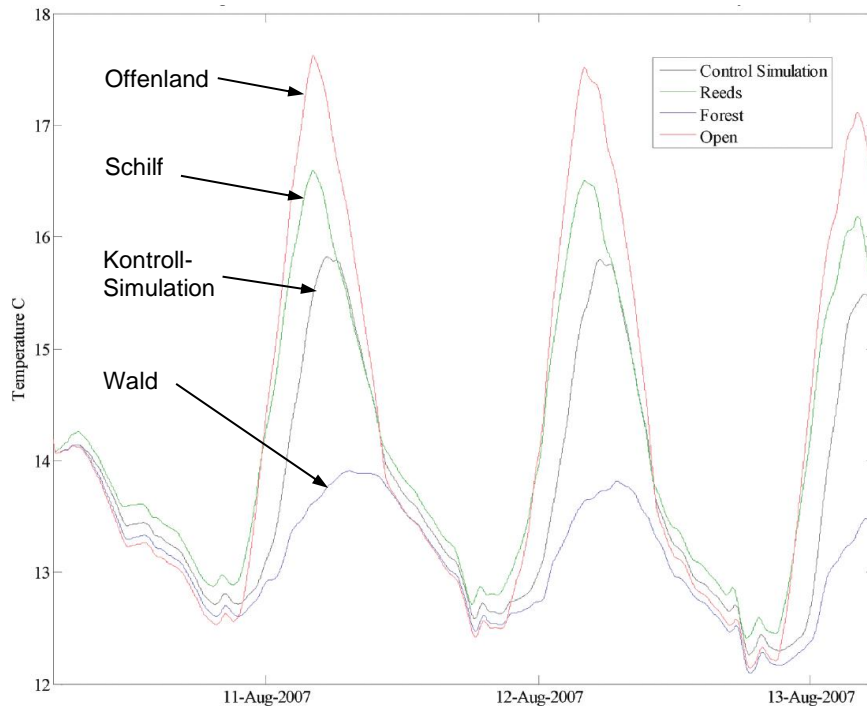


Abbildung 5: Modellierte Wassertemperaturen in Abhängigkeit vom Vegetationstyp (Quelle: Roth et al. 2010)

Ähnliche Ergebnisse liefern die Modellierungen von Moosmann et al. (2005) für die Orbe. Durch starke Beschattung (z.B. durch Wald, Ufergehölze) auf einigen hundert Meter Länge kann die Tageshöchsttemperatur um mehrere Grad abgekühlt werden, auf bspw. 400 m Länge um fast 4°C. Bei geringem Abfluss nähert sich die Wassertemperatur unterhalb der beschatteten Strecke jedoch rasch den ursprünglich hohen Werten.

Naturmessungen bestätigen den immensen Einfluss von Wald bzw. Ufergehölzen auf die Wassertemperatur kleiner und mittlerer Fließgewässer. Bei Untersuchungen an Forellengewässern in Südengland betrug die Differenz der Tageshöchsttemperaturen zwischen beschatteten und unbeschatteten typischerweise ca. 5°C (Broadmeadow et al. 2010), lag teilweise aber auch deutlich darüber (Abbildung 6). Ähnliche Ergebnisse liefern Untersuchungen aus Oregon (Johnson & Jones 2000), bei denen die Auswirkungen des Entfernens der Ufervegetation (Holzschlag) auf die Wassertemperatur untersucht wurde. Die Maximaltemperatur nahm um 7°C zu, die Tagesschwankung erhöhte sich im Juni von 2° auf 8°C. Erst 15 Jahre nach dem Holzschlag stellte sich wieder das ursprüngliche Temperaturregime ein. Noch grössere Temperaturzunahmen konnten Moore et al. (2005) in Kahlschlaggebieten nachweisen, sie betrug bis zu 13°C! Etwas tiefere Werte nennt Spees (2015) für Nordengland. Demnach sind beschattete Abschnitte dort im Mittel etwa 1.5°C kühler als unbeschattete, die Tageshöchsttemperaturen sind 2 – 3°C niedriger; bei breiten Gehölzstreifen und Auwald sind noch grössere Abkühlungen möglich.

Die Autoren der genannten Studien leiten aus ihren Untersuchungen ab, dass eine ausreichende Beschattung die wesentliche Voraussetzung für ein gewässertypisches Temperaturregime ist. Hinsichtlich des Masses der Beschattung und der zu treffenden Massnahmen gibt es jedoch Unterschiede, was nicht zuletzt über die unterschiedlichen Naturräume zu begründen ist, in denen die Untersuchungen stattfanden. Nach Broadmeadow et al. (2010) muss die Beschattung (in Südengland) mindestens 80% betragen, um die kritische Temperatur von ca. 19°C in Forellengewässern möglichst dauerhaft zu unterschreiten. Auch Elber et al. (2019) empfehlen für kleine und mittlere Gewässer bis 10 m Gerinnebreite eine Beschattung von mindestens 80%. Andere Autoren gehen weiter. So empfehlen Davies-Colly et al. (2000)

einen 40 m breiten Gehölzstreifen, um die mikroklimatische Belastung ausreichend zu reduzieren. Nach Osborne & Kovacic (1993) ist dagegen ein je Ufer 10 – 30 m breiter Streifen ausreichend, um ein naturnahes Wassertemperaturregime zu gewährleisten.

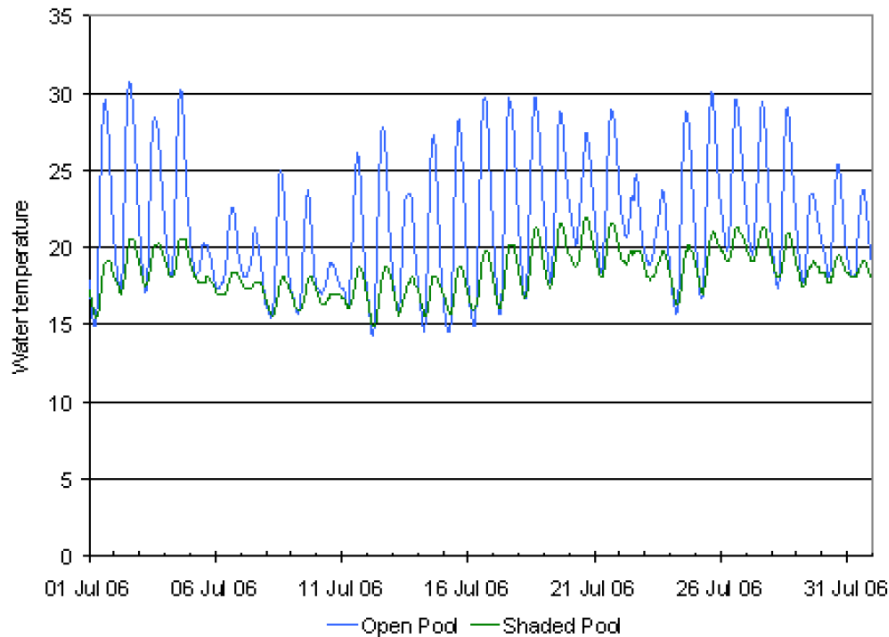


Abbildung 6: Temperaturverläufe in Kolken eines offenen und beschatteten Gewässerabschnitts in Südengland (Quelle: Broadmeadow et al. 2010, zitiert in <https://www.forestry.gov.uk>)

2.3 Gewässerstruktur: Förderung ausreichender Fließgeschwindigkeiten und Fliesstiefen

= Massnahmen im Gewässer (Sohle)

Die Gewässerstruktur beeinflusst wesentlich die Fließgeschwindigkeit und damit die Zeit, während der ein Wasserpaket der Sonnenstrahlung bzw. hohen Lufttemperaturen ausgesetzt ist. Dies zeigt sich vor allem auch in der Breite der Wasseroberfläche, über die das Gewässer Strahlungsenergie aufnimmt und ein Temperatureaustausch zwischen dem Wasser und der im Sommer meist wärmeren Luft stattfindet.

Der Grossteil der Bäche und kleinen Flüsse des schweizerischen Mittellands ist natürlicherweise gewunden oder mäandrierend und weist daher oft ein ausgeprägtes Niederwassergebinne (Talweg) auf (Abbildung 7). Bei Niedrigwasser konzentriert sich der wenige Abfluss auf dieses Gerinne, wodurch die Fließgeschwindigkeit und die Abflusstiefe vergleichsweise gross sind und die Wasserspiegelbreite gegenüber grösseren Abflüssen deutlich sinkt. Eine natürliche Laufform trägt somit wesentlich zum Erhalt sommerkühler Wassertemperaturen bei.



Abbildung 7: Natürlicher Abschnitt des Dindlikerbachs / Humlikon mit ausgeprägtem Niederwassergerinne (Foto: P. Sieber)

Begradigte Fließgewässer besitzen dagegen meist trapezförmige Querprofile mit unnatürlich breiten Niedrig- und Mittelwasserprofilen (Abbildung 8). Durch die Begradigung kann sich kein Talweg mehr ausbilden, die Sohle ist verflacht und das Gewässer durch geringe Fließstiefen über die ganze Sohlenbreite gekennzeichnet. Verstärkt wird dieser Zustand durch häufig zur Sohlenstabilisierung eingesetzte Schwellen. Die auch bei Niedrigwasser grosse Wasseroberfläche begünstigt in Kombination mit den geringeren Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten die Erwärmung ausgebauter Gewässer. Erschwerend kommt hinzu, dass ihre Sohle häufig kolmatiert und daher der Zustrom kühlen Grundwassers unterbrochen oder reduziert ist.



Abbildung 8: Ausgebaute Wiese in Lörrach mit Doppeltrapezprofil, regelmässigen Schwellen und verflachter Sohle (Fotos: M. Mende)

Verstärkt werden die negativen Effekte des Gewässerausbaus auf den Temperaturhaushalt durch grössere Querbauwerke, wie z.B. Wehre, deren Oberwasser bei Niedrigwasser Stillwassercharakter besitzt.

Allgemeingültige quantitative Aussagen zum Einfluss der Gewässerstruktur auf die Wassertemperatur sind nicht möglich. Klar ist jedoch, dass ein naturnahes Fließgewässer mit ausgeprägtem Niederwassergerinne, das auch an Hitzetagen mit wenig Abfluss vergleichsweise grosse Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen aufweist, am wenigsten zur Erwärmung neigt. Wo immer möglich sollte den Gewässern daher Raum für eine eigendynamische Entwicklung gegeben werden. Aufweitungen im Bereich des Niedrig- und Mittelwasserprofils sollten jedoch unterbleiben, da sie den Temperaturstress für aquatische Lebewesen verschärfen.

Kann sich das Niederwassergerinne z.B. aus Platzgründen nicht natürlicherweise entwickeln, sollten Strukturmassnahmen zu seiner Induzierung angedacht werden (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Enziwigger in Willisau links 2009 vor Massnahmen und rechts 2013 nach dem Einbau von Blöcken und Faschinen. Zusammen mit dem randlichen Bewuchs hat sich eine grössere Strömungsvielfalt und ein konzentrierterer Abfluss eingestellt (Fotos: Kanton Zürich, vif, Abteilung Naturgefahren)

2.4 Massnahmen in der Fläche

Mit Massnahmen im Gewässer (Kap. 2.3) oder in unmittelbarer Gewässernähe (Kap. 2.2) kann gezielt Einfluss auf das Temperaturregime eines bestimmten Gewässerabschnitts genommen werden. Die Wirkung dieser Massnahmen ist vor allem lokal. Massnahmen in der Fläche, also innerhalb des Einzugsgebiets eines Fließgewässers, wirken dagegen meist grossräumiger. Ihre Wirkung geht vor allem auf zwei Mechanismen zurück:

1. Erhöhung des Niedrigwasserabflusses und Anhebung des Grundwasserstands durch Wasserretention in der Fläche
2. Beeinflussung des Lokalklimas und damit der Lufttemperatur durch verstärkte Beschattung und Evapotranspiration.

Zu 1): Wie bereits in Kap. 2.1 erläutert, war unsere Landschaft ursprünglich durch ein grosses Wasserretentionsvermögen gekennzeichnet, wodurch Niederschlagswasser zurückgehalten und nur stark zeitverzögert über das Grundwasser an die Fließgewässer weitergeben wurden. Der damit verbundene erhöhte Basisabfluss und Kontakt zum kühlen Grundwasser tragen wesentlich zu einer Dämpfung der Wassertemperaturschwankungen und auch der Maximalwerte bei. Zur Verbesserung der Retentionswirkung gibt es eine Vielzahl von, zumindest teilweise recht einfach umzusetzenden Möglichkeiten, wie z.B.:

- Wasserrückhalt und -versickerung in Siedlungsgebieten, Wald und offener Landschaft (Abbildung 10)
- Wiedervernässung von Feuchtgebieten (Moore, Auen, Sümpfe, Feuchtwiesen etc.) z.B. durch Schliessen von Drainagen und Entwässerungsgräben
- Verringerung von Oberflächenabfluss (z.B. durch Flächenentsiegelung, Dachbegründungen, angepassten Ackerbau (dauerhafte Begrünung, Mulchen, Humusaufbau)



Abbildung 10: Versickerungssysteme. Links: Mulden-Rigolensystem im Siedlungsgebiet (Quelle: Wikipedia); rechts: Hangparallele Geländemulde im Landwirtschaftsgebiet (Fotos: Michal Kravcik)

Zu 2) Die Retention des Wassers ist eine grundlegende Voraussetzung für eine verstärkte Evapotranspiration durch Pflanzen und hierbei insbesondere die Bäume. Mit ihren weitreichenden Wurzeln können Bäume das Wasser der tiefliegenden Bodenschichten erreichen und so auch in Trockenzeiten durch Evapotranspiration die Landschaft kühlen. In Berggebieten ist dieser Effekt in Dürreperioden sogar noch stärker ausgeprägt als im Flachland (Mastrotheodoros et al. 2020). Zur Kühlung der Landschaft und damit indirekt auch der Gewässer sind alle Massnahmen sinnvoll, mit denen die Evapotranspiration gesteigert und die Austrocknung der Böden (z.B. durch Wind) verringert wird, wie z.B.:

- Vergrößerung der Waldfläche bzw. Waldumbau. Hierbei ist naturnahen Laub- und Mischwäldern aufgrund der wesentlich höheren «Kühlleistung» der Vorrang zu geben.
- Strukturierung der Landschaft mit Hecken und Baumgruppen.
- Verstärkte Nutzung von Agroforstsystemen in der Landwirtschaft (Agroforstsysteme sind eine Form der Landnutzung, bei der die landwirtschaftliche Produktion mit dem Anbau von Bäumen oder Sträuchern auf derselben Fläche kombiniert wird.).
- Erhöhung des Grünanteils in Siedlungsgebieten (z.B. durch Entsiegelung, Umnutzung von Verkehrsflächen, Fassadenbegrünungen, Verbot von «Schottergärten», Gründächer).

Durch die starke Durchwurzelung tragen die Pflanzen zudem zu verstärkter Versickerung und damit ebenfalls zur Wasserretention bei.

Eine Quantifizierung des Einflusses dieser Massnahmen in der Fläche und damit in den Einzugsgebieten der Fließgewässer auf ihre Wassertemperatur ist aufgrund der hohen Komplexität der Prozesse kaum möglich. Aus der grossen «Kühlleistung» insbesondere naturnaher Wälder (Kap. 2.2.1) lässt sich jedoch ableiten, dass sich die Maximal-Lufttemperaturen vor allem «ausgeräumter» Landschaften durch eine Kombination von verstärkter Wasserretention und mehr Baumbewuchs um mehrere Grad verringern lassen. Dass sich diese Verringerung in Kombination mit dem erhöhten Basisabfluss auch positiv auf die Fließgewässer auswirkt, ist selbstverständlich.

3 Fragestellung der Untersuchung

Punktuelle Untersuchungen zum Temperaturverhalten von Fließgewässern sind hinlänglich vorhanden. Untersuchungen zur Wassertemperatur im gesamten Längsverlauf eines Fließgewässers wurden bisher noch nicht durchgeführt. Diese Lücke soll mit der vorliegenden Arbeit gefüllt werden. Ebenfalls wenig bekannt ist der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Wassertemperatur von Fließgewässern. Wir haben uns die folgenden Fragen gestellt:

- Wie verändert sich die Wassertemperatur im Längsverlauf eines Fließgewässers zu verschiedenen Tageszeiten?
- Welchen Einfluss haben die folgenden Faktoren auf die Wassertemperatur:
 - Beschattung durch Vegetation
 - Seitliche Zuflüsse
 - Einleitung von geklärtem Wasser (ARA)
 - Eindolungen
 - Harte Verbauung
 - Natürliche oder naturnahe Gerinneform
- Welchen Einfluss hat ein Biberdamm auf die Wassertemperatur?

4 Methodik

4.1 Untersuchungsgebiete

Es wurden insgesamt sechs Fließgewässer in den Kantonen Aargau und Zürich untersucht. Vier dieser sechs Gewässer wurden in ihrem Längsverlauf analysiert:

- Sihl (ZH)
- Jonen (ZH)
- Wyna (AG)
- Erusbach (AG)

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.

Zwei weitere Bäche, der Tegerbach (AG) und der Rickebach (AG) wurden punktuell im Bereich von Biberbauten untersucht.

Abbildung 11 zeigt eine Übersicht über alle untersuchten Fließgewässer. Im Anhang befindet sich für jedes Gewässer ein Kartenblatt mit den Standorten der Messpunkte.

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.

	Einzugsgebiets- fläche [km ²]	Sohlenbreite [m]	Untersuchte Länge [km]	Abfluss [m ³ /s] Q ₁₈₂ / Q ₃₄₇
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.

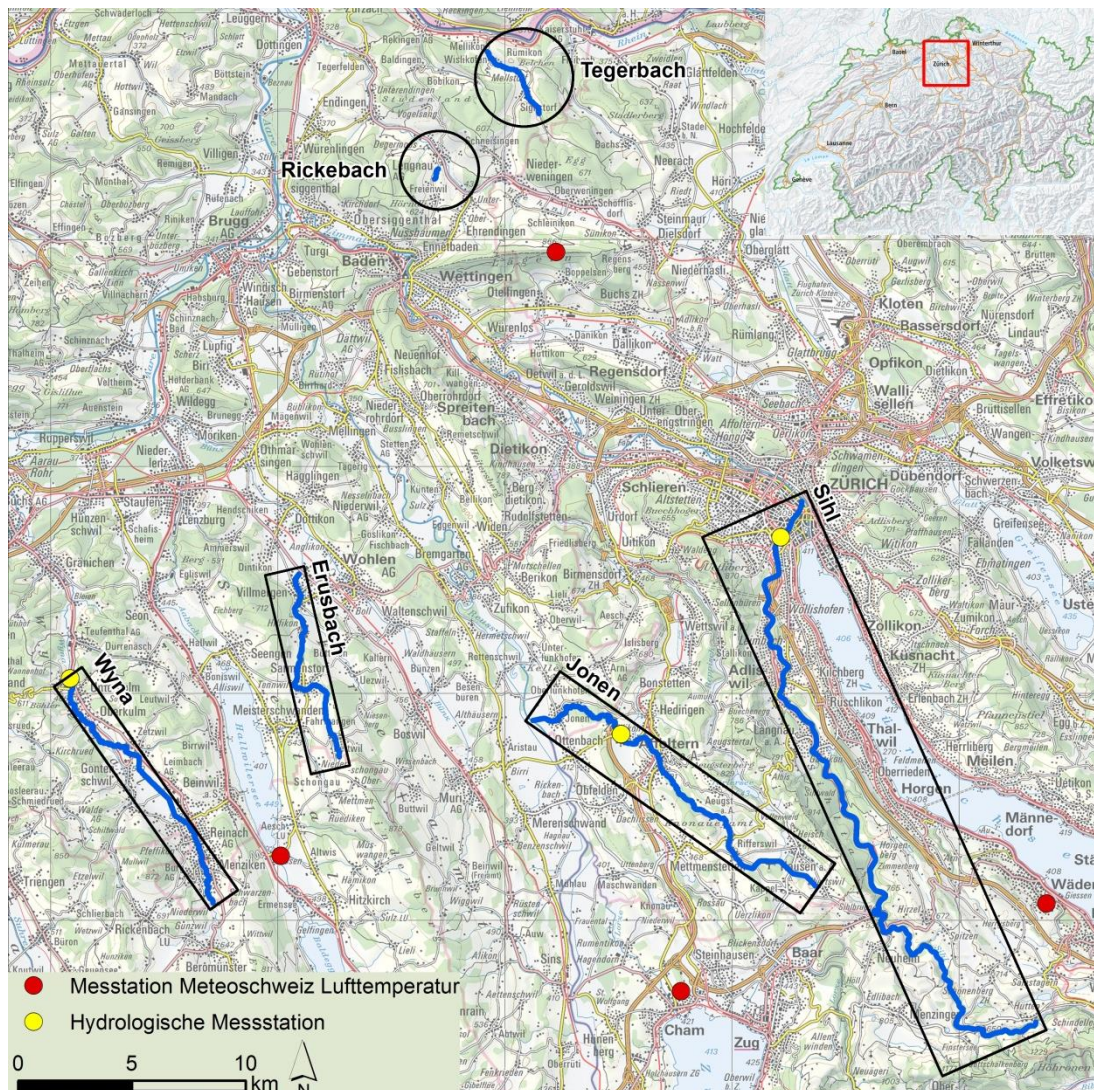


Abbildung 11: Übersicht der untersuchten Fließgewässerstrecken mit Standorten der Abflussmessstationen und der Temperatur-Messstationen (Luft). Im Anhang befindet sich für jedes Gewässer ein Kartenblatt mit den Datenlogger-Standorten (Quelle: swisstopo).

4.2 Eingesetzte Messinstrumente

4.2.1 Datenlogger *HOBO® Water Temp Pro v2*

Für die Messungen wurden 110 Temperaturlogger der Marke *HOBO® Water Temp Pro v2* (Abbildung 12) der Firma Onset mit den folgenden Eigenschaften eingesetzt:

- Messbereich: -40° bis $+70^{\circ}\text{C}$ in der Luft, Maximaltemperatur im Wasser: $+50^{\circ}\text{C}$
- Genauigkeit: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ von 0° bis 50°C
- Auflösung: 0.02°C bei 25°C
- Wasserdichtigkeit: bis 120 Meter
- Abmessungen: max. Durchmesser 3.0 cm; Länge 11.4 cm
- Kalibrierung: werkskalibriert



Abbildung 12: Eingesetzter Datenlogger *HOBO® Water Temp Pro v2* (Abbildung ca. in Originalgrösse)

Die folgenden Gründe waren, abgesehen von den Messeigenschaften, für die Wahl dieses Messgeräts ausschlaggebend:

- Robustheit, auch bei Einsatz im Wasser
- Handlichkeit: kleines und leichtes Gerät, einfach zu transportieren
- einfache Handhabung bezüglich Aufsetzens und Datenauswertung
- tiefer Preis
- Im Einsatz bewährt: Der Temperaturlogger *HOBO® Water Temp Pro v2* wird von der Abteilung Gewässerschutz des AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft), Kanton Zürich eingesetzt. Er kam auch anlässlich von Untersuchungen in der Sense in den Kantonen Bern und Freiburg zum Einsatz (Fischereiliche Bewirtschaftung Sense, 2018).

Die Datenauswertung erfolgte mit der herstellereigenen Software *HOBOware® Pro*, Version 3.7.16. Die Rohdaten wurden zur weiteren Verarbeitung in Excel exportiert.

4.2.2 Prüfung der Logger

Alle 110 Logger wurden auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. Dazu wurden jeweils 19 Logger gleichzeitig in ein Wasserbad von 30°C eingetaucht, welches über Nacht (Messbeginn: 19.00 Uhr, Messende: 07.00 Uhr) allmählich auf ca. 9°C abkühlte. So konnte einerseits die Funktionstüchtigkeit über einen Temperaturbereich von 9-30°C getestet werden, und gleichzeitig konnten allfällige Abweichungen einzelner Logger registriert werden. Es handelte sich somit um einen Relativtest.

Es wurden sechs Testläufe (à 19 Logger) durchgeführt, damit alle 110 Logger getestet werden konnten. Das Messintervall betrug 1 Minute. Bei fünf Testläufen betrug die maximale Differenz aller Messungen zwischen dem tiefsten und höchsten gemessenen Wert zwischen 0.148 und 0.184°C. Ein Testlauf zeigte eine maximale Differenz aller Messungen von 1.186°C. Ein Datenlogger mass fehlerhaft und wurde nicht weiter eingesetzt. Für die übrigen Logger betrug die maximale Differenz 0.232°C. Die Testmessungen liegen somit mit Ausnahme des fehlerhaften Loggers im vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsbereich von $\pm 0.21^\circ\text{C}$.

4.3 Vorgehen, Ablauf der Messungen

4.3.1 Installation der Logger

Zur Befestigung der Datenlogger unter Wasser wurde ein 60 cm langer Metallstab in die Bachsohle geschlagen. An diesem Stab wurde der Logger mittels Briden befestigt und in Fließrichtung ausgerichtet. Über den Logger wurde eine Sonnenabdeckung angebracht, die diesen vollständig abdeckte. Die Sonnenabdeckung verhinderte eine Erwärmung des Datenloggers infolge direkter Sonneneinstrahlung.



Abbildung 13: Am Metallstab befestigter Datenlogger mit Sonnenabdeckung.

4.3.2 Testmessungen

Es wurden Testmessungen vorgenommen, um die Wirkung der folgenden Faktoren zu evaluieren:

A) Wirksamkeit einer Sonnenabdeckung:

- Prüfung der grundsätzlichen Wirkung (mit / ohne Sonnenschutz)
- Prüfung des Einflusses der Farbe der Sonnenabdeckung (hellgrau / schwarz)

Dazu wurden sechs Logger auf einem vollständig besonnten Abschnitt in die Jone montiert. Die Messstelle befand sich beim Flugplatz Hausen (Koordinaten 681'120/232'536). Die Messungen wurden vom 21.6.2019 (14.00 Uhr) bis 28.6.2019 (07.00 Uhr) durchgeführt. Zwei Logger waren nicht beschattet und jeweils zwei mit einer hellgrauen resp. mit einer schwarzen Kunststoffabdeckung beschattet (Abbildung 14). Es wurde bewusst eine hellgraue und nicht eine weiße Abdeckung gewählt, damit die Untersuchungsinstallation für Passanten möglichst wenig erkennbar war.

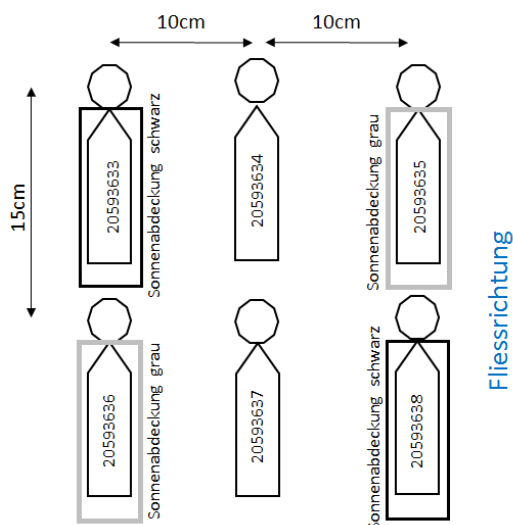


Abbildung 14: Messdispositiv Test A: Wirksamkeit einer Sonnenabdeckung

Die Testresultate zeigen, dass die beiden Datenlogger ohne Sonnenabdeckung um bis zu 1.5°C höhere Temperaturen messen. Die direkte Sonneneinstrahlung hat somit einen Effekt auf die Temperaturmessung, auch wenn die Datenlogger einer permanenten „Wasserkühlung“ ausgesetzt sind.

Die Farbe der Abdeckung der Logger hat einen Einfluss auf die Messung. Eine schwarze Abdeckung kann den Logger dann geringfügig erwärmen, wenn sie ihn berührt und somit eine Wärmeübertragung möglich ist. Dies war bei einer der beiden schwarzen Abdeckungen der Fall (Abbildung 15, s. dunkelblaue, strichpunktierte Messung). Eine hellgraue Abdeckung führte zu den besten Resultaten.

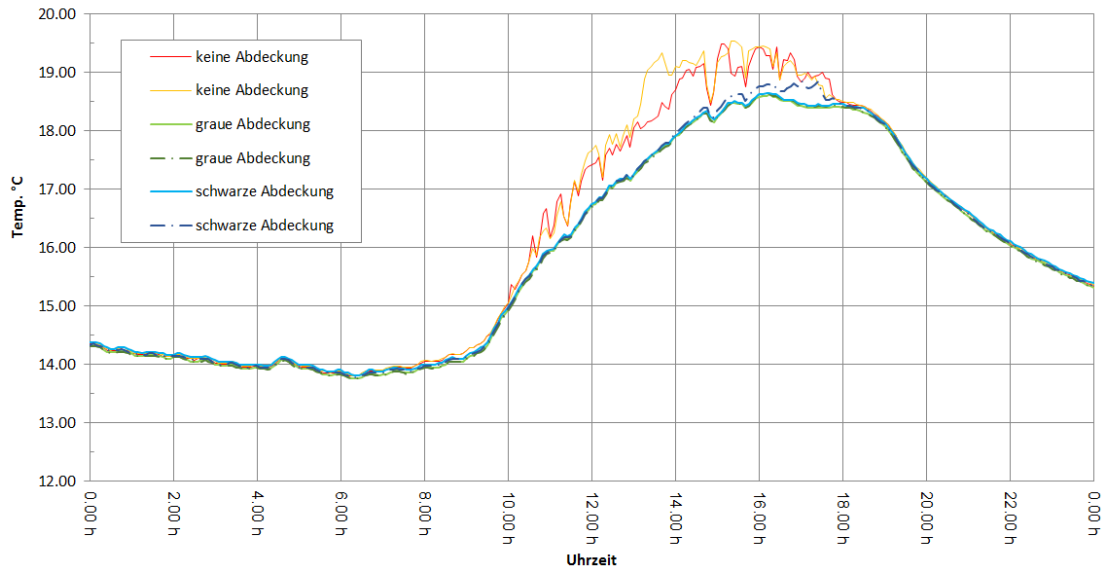


Abbildung 15: Messresultat des Tests A zur Untersuchung der Wirksamkeit einer Sonnenabdeckung am Beispiel der Jonen beim Flugplatz Hausen am 21.6.2019.

Für die weiteren Messungen wurden hellgraue Sonnenabdeckungen verwendet.

B) Prüfung des Durchmischungsverhaltens von zwei zusammenfliessenden Gewässern:

- Wie gross ist die Distanz vom Zusammenfluss bis zu einer möglichst vollständigen Durchmischung und damit gleichbleibenden Temperatur über die ganze Gewässerbreite?

Vom 21.6.2019, 14.00 Uhr bis 28.6.2019, 7.00 Uhr wurde ein exemplarischer Versuch an der Jonen in Hausen am Albis durchgeführt. Es wurde die Temperatur der beiden zuströmenden Bäche Jonen und Heischer Dorfbach gemessen (Abbildung 16, s. J_T_013 und J_T_012). Im Abstand von 5m, 20m und 70m ab Zusammenfluss wurden jeweils drei Logger links, mittig und rechts installiert.

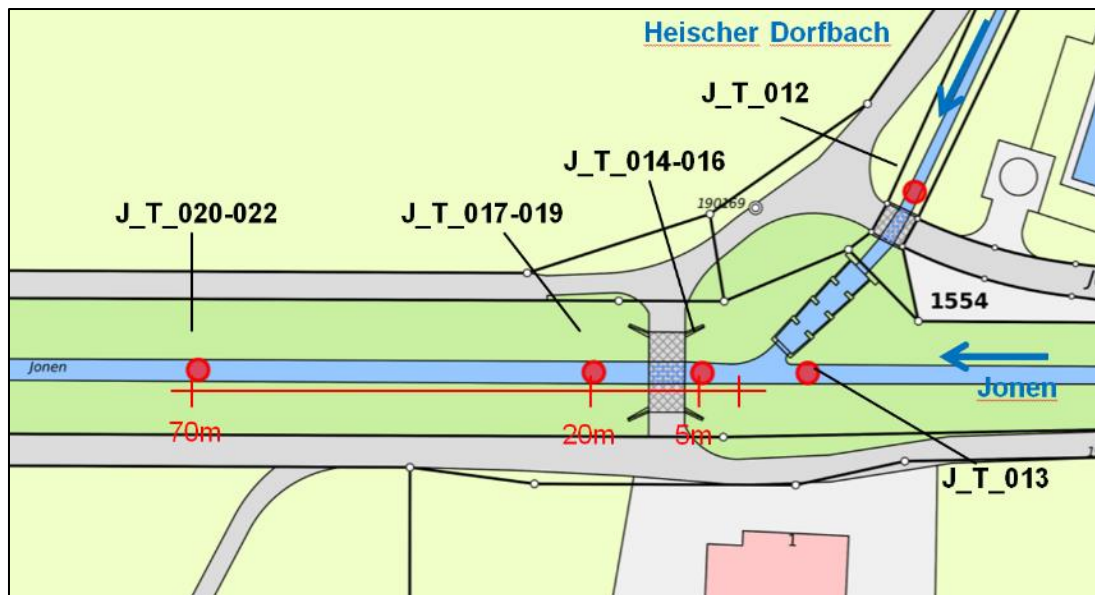


Abbildung 16: Messdispositiv Test B: Einfluss des Durchmischungsverhaltens zweier zusammenfließender Gewässer (Jonen und Heischer Dorfbach in der Gemeinde Hausen am Albis).

Es sind Temperaturdifferenzen über die Gewässerbreite in Abhängigkeit von der Distanz des Zusammenflusses der beiden Gewässer und der Temperatur des jeweiligen Wasserursprungs erkennbar. Nach 70 m schwankt die Differenz der drei Messungen (links, Mitte, rechts) zwischen 0.00 und 0.48°C (nach 5m: 0.02 – 1.58°C; nach 20m: 0.00 – 0.86°C). Die Messresultate (Abbildung 17) zeigen somit, dass nach 5m kaum eine Durchmischung stattgefunden hat, dass hingegen nach über 70m von einer annehmbaren Durchmischung ausgegangen werden kann. Für die weiteren Messungen wurde bei seitlichen Gewässereinmündungen eine Distanz von ca. 100m ab Zusammenfluss für die Loggerinstallation eingehalten.

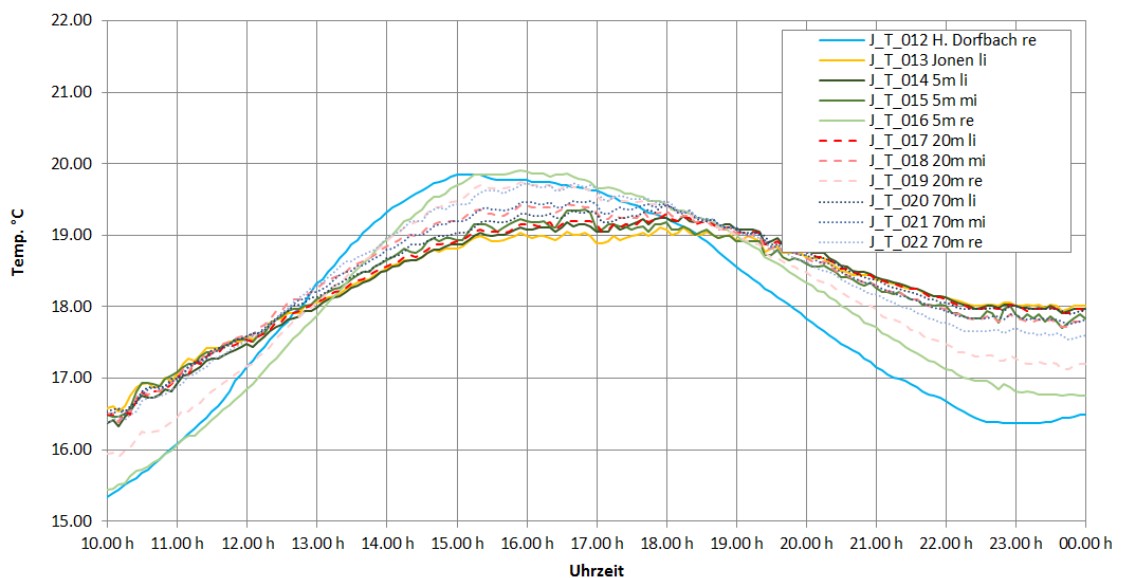


Abbildung 17: Messresultat des Tests B zur Untersuchung des Durchmischungsverhaltens am Beispiel der Jonen beim Zusammenfluss mit dem Heischer Dorfbach am 27.6.2019. Es herrschten Niedrigwasserabflussbedingungen.

Bei der Interpretation des vorliegend untersuchten Durchmischungsverhaltens zweier Gewässer ist zu berücksichtigen, dass die „Fahne“ einer seitlichen Einleitung oder der Zusammenfluss zweier Gewässer immer auch abhängig ist von der Grösse der jeweiligen Gewässer und von der Dynamik (Morphologie) im Bereich des Zusammenflusses.

4.3.3 Messungen an den Fließgewässern

Die Messungen an den zu untersuchenden Fließgewässern wurden an folgenden Daten 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

Es handelte sich um Hitzeperioden. Die gemessenen Lufttemperaturen an umliegenden Messstationen der MeteoSchweiz sind in Abbildung 18 dargestellt.

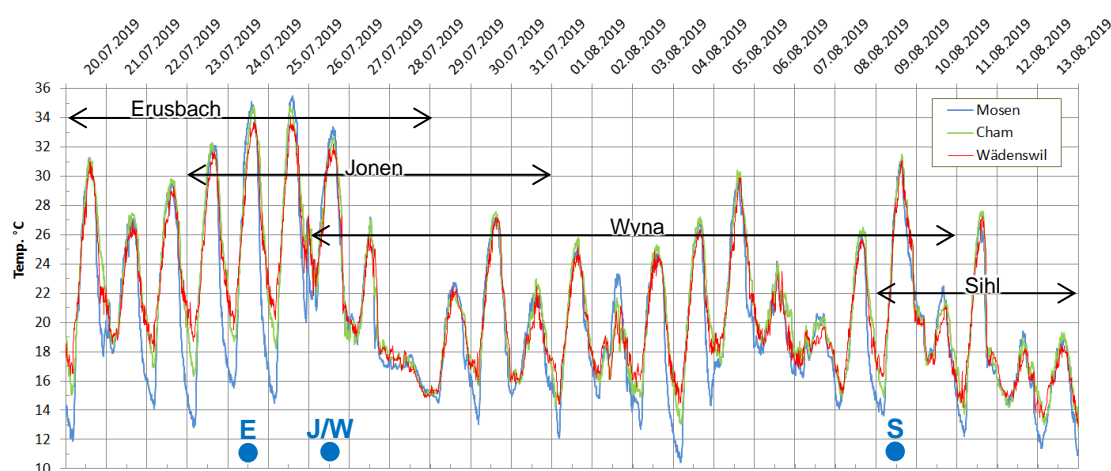


Abbildung 18: Lufttemperatur der MeteoSchweiz-Messstationen Mosen, Cham und Wädenswil. Die Standorte der Messstationen sind auf der Übersichtskarte in Abbildung 11 eingezeichnet. Die Messperioden der untersuchten Fließgewässer sind als schwarze Pfeile dargestellt. Die ausgewählten Tage für die Darstellungen der Temperaturverläufe (Anhang) sind als blaue Punkte mit dem Anfangsbuchstaben des jeweiligen Gewässers bezeichnet.

Es wurde jeweils ein Messintervall von 5 Minuten gewählt. Zu jedem Temperaturlogger wurde ein Messprotokoll geführt, in welchem alle relevanten Daten festgehalten wurden (Koordinaten, Mess-Zeitraum, Wassertiefe, Tiefe des Loggers unter der Wasseroberfläche, Bemerkungen). Besondere Vorkommnisse (z.B. Logger nicht mehr im Wasser bei Demontage) wurden vermerkt, was sich für die spätere Interpretation der Daten als wertvoll zeigte.

Die Messstandorte wurden vorgängig gutachterlich im Hinblick auf die Fragestellungen festgelegt und mit den Fachstellen der Kantone Aargau (Jagd und Fischerei) und Zürich (AWEL, Abt. Gewässerschutz und ALN, Fischerei- und Jagdverwaltung) bereinigt.

Einzelne Logger konnten im Feld z.B. aufgrund von Unzugänglichkeit nicht wie gewünscht platziert werden. Es wurde ein optimaler Alternativstandort gewählt oder der Standort wurde weggelassen.

Für die Auswertungen wurden die Tage mit den höchsten Wassertemperaturen ausgewählt. Die höchsten gemessenen Lufttemperaturen bei nahe gelegenen Messstationen lagen an diesen Tagen zwischen 33-35°C (Erusbach, Jonen, Wyna) resp. bei ca. 31°C (Sihl).

5 Ergebnisse

5.1 Thermische Charakteristika der untersuchten Gewässer

Bei allen untersuchten Fließgewässern zeigt 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.

Im Unterschied zu den kleineren Gewässern nimmt die Wassertemperatur der Sihl im Flussverlauf weitgehend kontinuierlich zu und erreicht ab ca. km 22 ihr Maximum von gut 26°C. Danach bleibt die Wassertemperatur weitgehend konstant und variiert nur noch leicht zwischen ca. 24.5 und 25.5°C. Auch die in den späteren Abendstunden durch Temperaturdrift (siehe Kap. 5.3) auftretenden Maximaltemperaturen im unteren Gewässerabschnitt liegen in diesem Bereich.

Ausgeprägt ist bei der Sihl auch die Temperaturdifferenz im Tagesverlauf (ΔT zwischen 8:00 und 18:00). Die Differenz nimmt zwischen km 5 und 23 annähernd linear zu und erreicht bei km 23 mit $\Delta T = 8.8^\circ\text{C}$ ihr Maximum. Bei den kleineren Gewässern ist die Temperaturschwankung im Tagesverlauf weit weniger ausgeprägt. Sie überschreitet nur in wenigen Ausnahmefällen 5°C .

Die Sihl ist das wärmste der vier untersuchten Gewässer. Die gemessene Maximaltemperatur betrug 26.1°C . Eine Temperatur von mehr als 25°C , die für Forellen tödlich ist (Kap. 1), wurde während der Messkampagne auf annähernd der Hälfte des 35.9 km langen Projektperimeters erreicht oder überschritten. In den kleineren Gewässern wurde die 25°C -Marke lediglich an der Jonen überschritten ($T_{\text{max}} = 25.3^\circ\text{C}$), jedoch im Unterschied zur Sihl nur auf einer relativ kurzen Strecke von ca. 1 km Länge. Die Maximaltemperatur der Wyna betrug 24.6°C , die des Erusbachs 21.9°C .

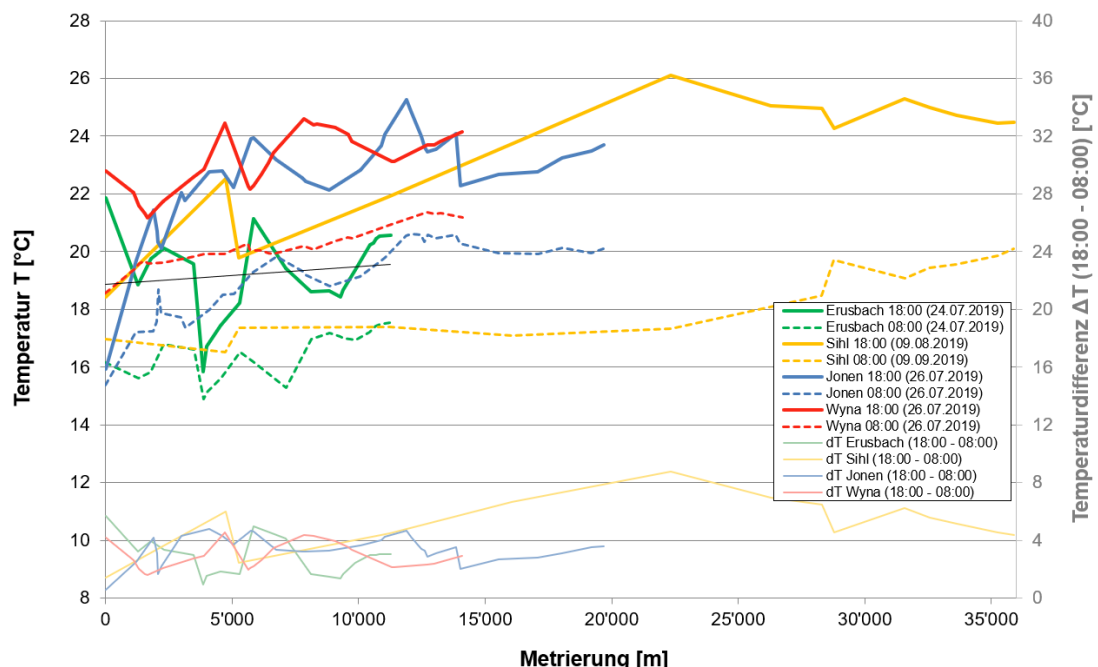


Abbildung 19: Temperatur-Längenprofile für Erusbach, Sihl, Jonen und Wyna jeweils um 8:00 und 18:00 Uhr (primäre Y-Achse; Messungen nicht am gleichen Datum!). Als 0-Punkt ist der oberste Datenlogger definiert. Auf der sekundären Y-Achse (rechts) sind die Temperaturdifferenzen zwischen 08:00 und 18:00 Uhr dargestellt.

5.1.1 Jonen

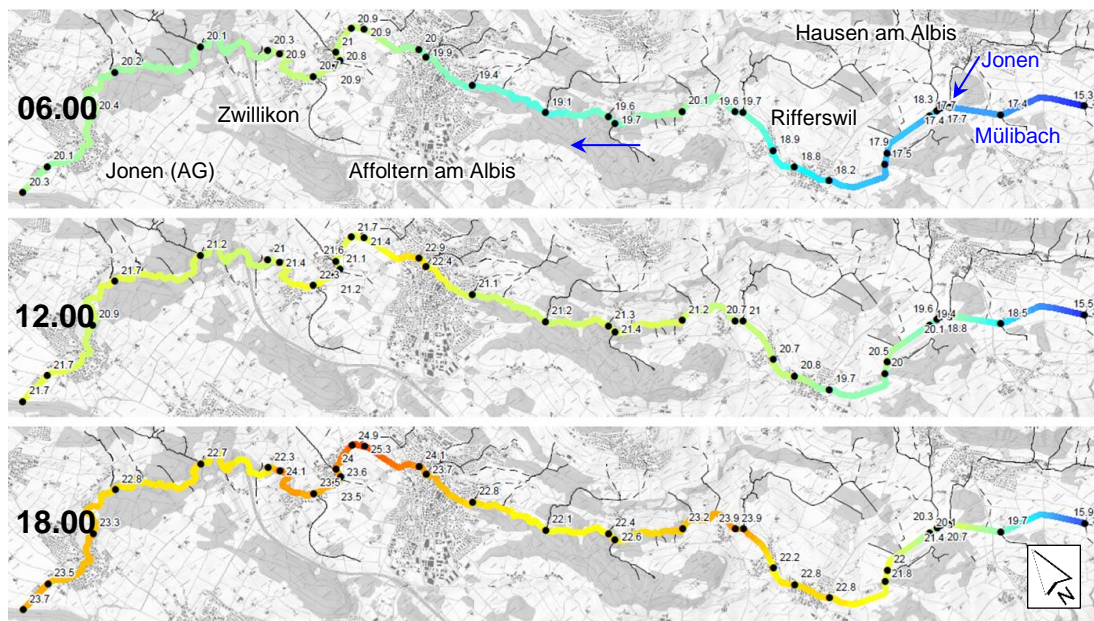


Abbildung 20: Temperaturverlauf in der Jonen am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fließrichtung: blauer Pfeil (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang). Der Zufluss der Jonen ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet.

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 (Kap. 5.4.1). Es finden auf der gesamten untersuchten Strecke immer wieder Abkühlungs- und Erwärmungstendenzen statt. Die höchsten Temperaturen wurden etwas unterhalb von Affoltern am Albis gemessen.

5.1.2 Sihl

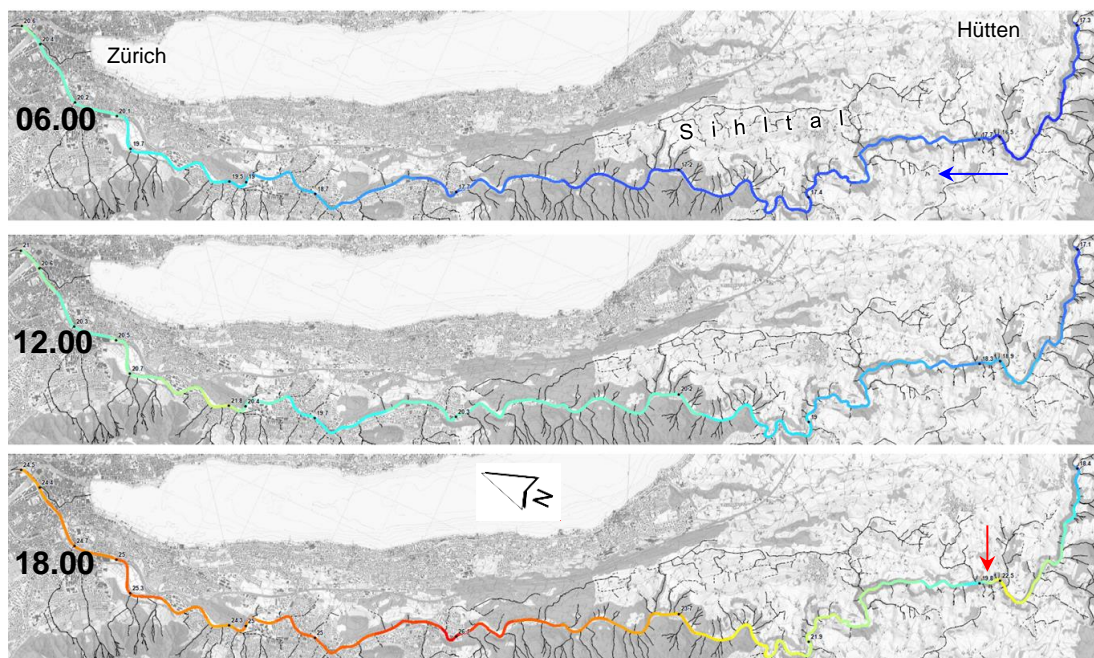


Abbildung 21: Temperaturverlauf in der Sihl am 9. August 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; blauer Pfeil: Fließrichtung; roter Pfeil: Wasserrückgabe des Kraftwerks Waldhalde (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).

Die Sihl ist mit 17.3°C beim obersten Messpunkt relativ kühl unter Berücksichtigung, dass sich oberhalb ein grosses Einzugsgebiet befindet (250 km²). Sie erwärmt sich im Tagesverlauf auf den ersten 4.5km markant, was auf die Wasserrücknahme für das Kraftwerk Waldhalde zurückzuführen ist (vgl. Kap. 5.4.3.4). Die Wasserrückgabe beim Kraftwerk ist durch eine deutliche Abkühlung gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf erwärmt sich die Sihl wieder auf bis zu 26°C.

5.1.3 Wyna

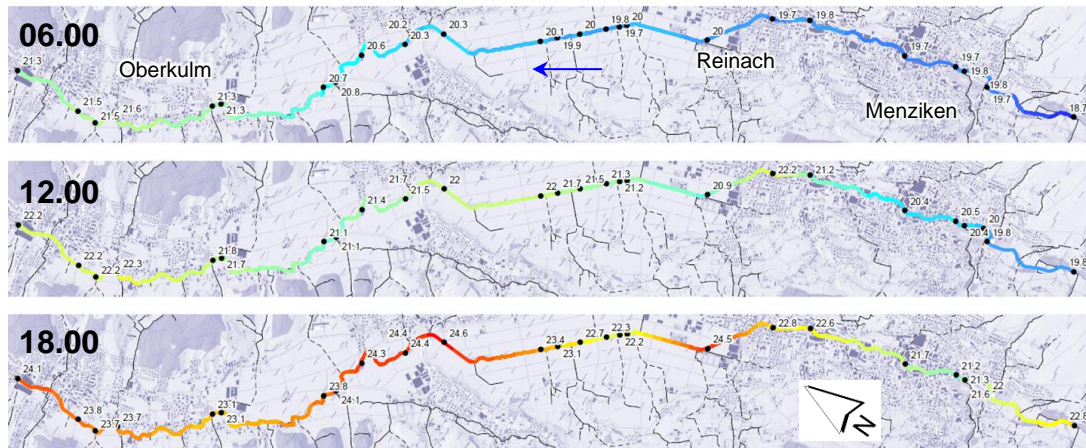


Abbildung 22: Temperaturverlauf in der Wyna am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fließrichtung: blauer Pfeil (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).

Ähnlich wie die Jonen zeigt auch die Wyna einen grundsätzlichen positiven Temperaturgradienten vom obersten zum untersten Messpunkt bei gleichzeitig lokalen Abkühlungs- und Erwärmungserscheinungen, die abhängig sind von den örtlich vorherrschenden Umgebungsverhältnissen.

5.1.4 Erusbach

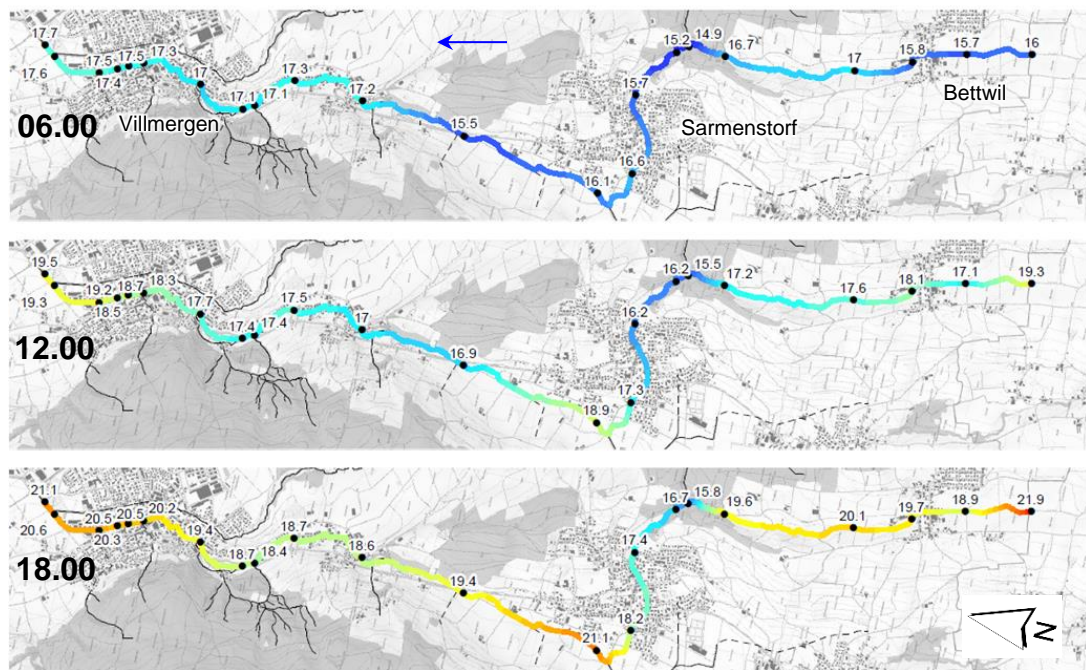


Abbildung 23: Temperaturverlauf im Erusbach am 24. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr; Temperatur-Angaben in °C; Fließrichtung: blauer Pfeil (Detaillierte Darstellung des gesamten Tages in 2-Stunden-Schritten im Anhang).

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

5.2 Tagesverlauf der Wassertemperatur

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

- Minimalwerte treten in den frühen Morgenstunden kurz nach Sonnenaufgang auf (ca. 6:00 bis 8:00)
- Maximalwerte treten am späten Nachmittag bis frühen Abend auf (ca. 16:00 – 20:00). Eine Ausnahme bildet die Sihl, das grösste untersuchte Gewässer. Hier treten die höchsten Temperaturen aufgrund von Temperaturdrift (Kap. 5.3) im unteren Projektperimeter teilweise später auf.
- Zwischen den Minimal- und Maximalwerten erfolgt ein meist sinuskurvenförmiger Anstieg bzw. Abfall (s. Bsp. Abbildung 24)
- Die Temperaturamplituden variieren stark in Abhängigkeit diverser Faktoren und liegen im Tagesverlauf zwischen 1 bis 5°C (Abbildung 24). Für die Sihl wurden noch höhere Amplituden gemessen (vgl. Abbildung 19).
- Am Beispiel der Jonen (Abbildung 24) ist der Wetterumschwung am 28. Juli mit deutlich kleineren Tagesamplituden und der allgemeinen Abkühlung erkennbar.

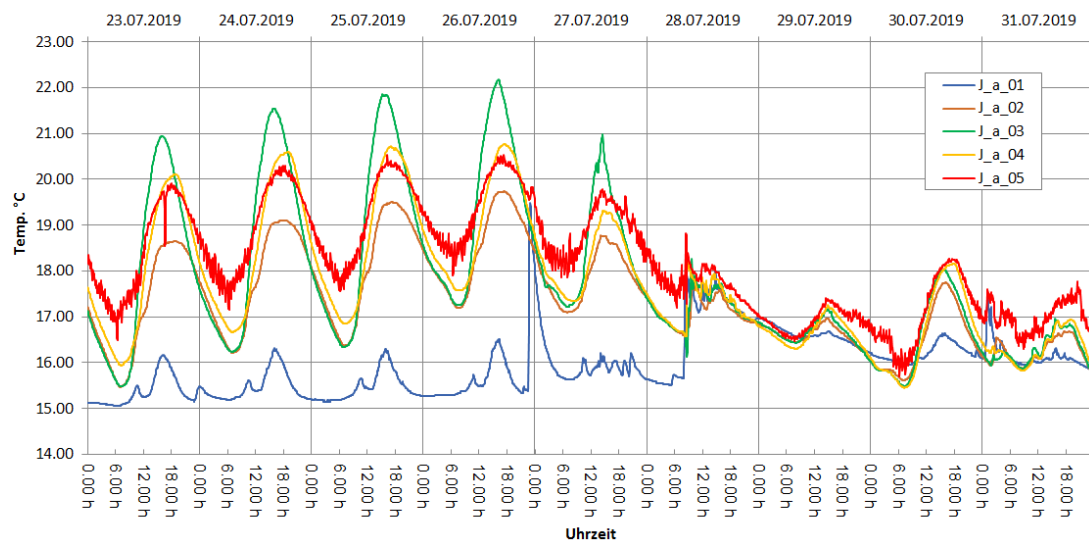


Abbildung 24: Messreihe der Jonen (resp. Mülibach: Messpunkte J_a_01 – J_a_03) am Beispiel der obersten 5 Messpunkte. Für weitere Erläuterungen zu den Temperaturkurven siehe Kap. 5.4.1 und 5.4.3.1.

5.3 Temperaturdrift

Eine Temperaturdrift, also die Verlagerung eines Wasserpaketes mit 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.

Es konnte bei allen untersuchten Gewässern ein positiver Temperaturgradient vom obersten zum untersten Messpunkt festgestellt werden. Der Effekt der Temperaturdrift war bei der Sihl am stärksten.

Mit einem Niedrigwasserabfluss von $Q_{347} = 2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ beim Pegel Sihlhölzli (Stations-Nr. 2176) ist die Sihl bereits ein vergleichsweise grosses Gewässer. Ein Wärmetransport (Temperaturdrift) war in den späteren Abendstunden über eine Strecke von ca. 5 km deutlich erkennbar und auch nachweisbar (Abbildung 25). Dies ist daran feststellbar, dass die höchsten Temperaturen im unteren Projektgebiet zwischen km 25 und 28 erst gegen 22:00 Uhr auftraten, also zu einem Zeitpunkt, als eine Erwärmung durch Sonneneinstrahlung nicht mehr möglich war. Das von oben zuströmende Wasser führte offensichtlich zu den hohen Temperaturen. Die lokal gemessene Abkühlung fand dort erst ab 22:00 Uhr statt im Gegensatz zu den oberhalb liegenden Messpunkten.

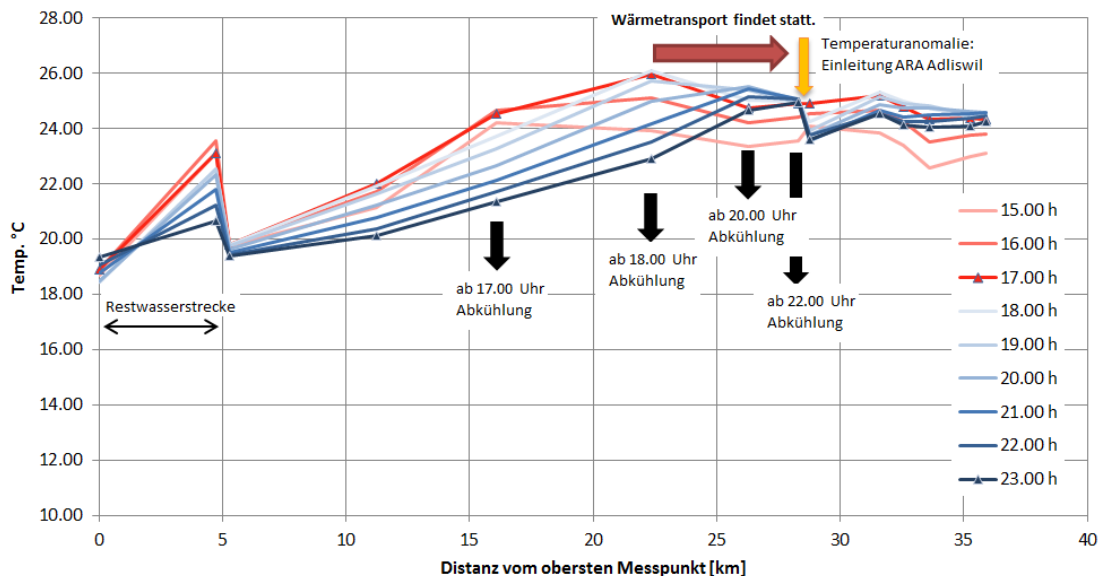


Abbildung 25: Temperatur-Längenprofil der Sihl am 9. August 2019 zwischen 15 und 23 Uhr. Die Erwärmung auf den obersten 5 km ist auf die Restwasserstrecke im Bereich des Kraftwerks Waldhalde zurückzuführen (vgl. auch Kap. 5.4.3.4). Zwischen km 22 und 28 findet ein Wärmetransport statt. Stunden mit starker Sonneneinstrahlung (Wassererwärmung möglich) sind in rot-Tönen dargestellt, Stunden mit geringer oder ohne Sonneneinstrahlung sind in blau-Tönen dargestellt. Die Temperaturanomalie bei km 29 (gelber Pfeil) ist begründet durch die Einleitung von kühlerem Klärwasser aus der Kläranlage Adliswil.

5.4 Einflussfaktoren

Fließgewässer sind komplexe Systeme, bei denen die Wassertemperatur von mehreren Einflussfaktoren gleichzeitig abhängt. Eine exakte Quantifizierung des Einflusses eines einzelnen Faktors ist daher nicht möglich, die Grössenordnung des Einflusses kann aber abgeschätzt werden.

5.4.1 Beschattung (fehlende / starke)

Das Mass der Beschattung konnte bei den Aargauer Gewässern Erusbach und Wyna gut anhand der vom Kanton erstellten Beschattungskarten beurteilt werden (Details zur Herleitung der Karten vgl. Hintermann & Weber, 2019). Das Mass der Beschattung reicht von «keine Beschattung» (0% Beschattung) bis «starke Beschattung» (100%). 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:

Die Wirkung fehlender oder geringer Beschattung auf die Wassertemperatur soll zunächst anhand von Beispielen erläutert werden:

Das Wasser des **Mülibachs** (Messpunkte J_a_01 – J_a_03; ab J_a_04 > **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 ($\Delta T = +5.5^\circ\text{C}$ um 18.00 Uhr; vgl. Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28).



Abbildung 26: Mülibach im Bereich der Messpunkte J_a_01 bis J_a_03. Der Kanal ist nur sehr spärlich beschattet (Quelle: GIS-ZH).



Abbildung 27: Mülibach (resp. Jonen ab Messpunkt J_a_04) am 26.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).

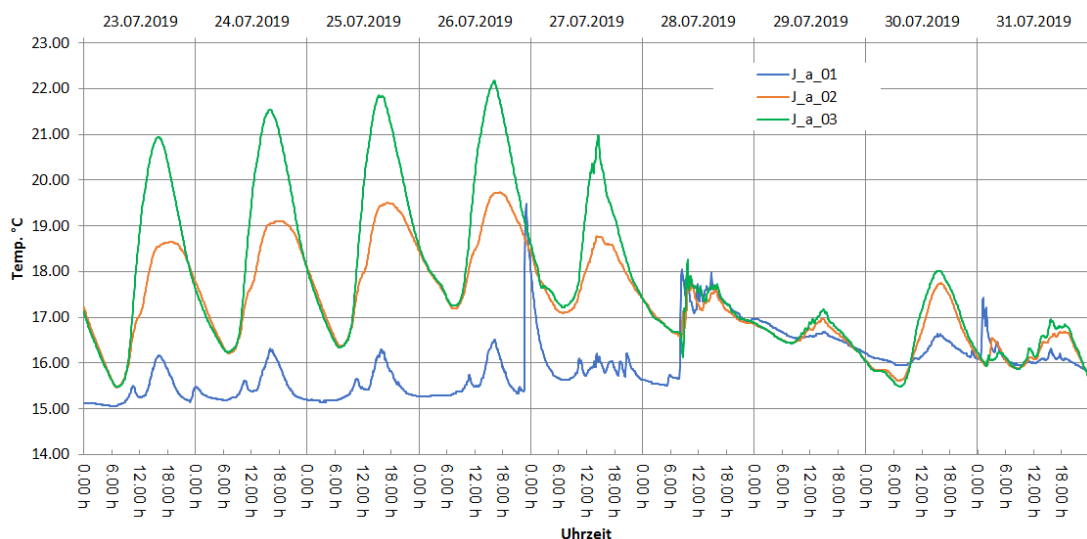


Abbildung 28: Zeitlicher Temperaturverlauf im Mülibach (ab Messpunkt J_a_04: Jonen) an den Messpunkten J_a_01 bis J_a_03.

Ein ähnlicher Einfluss fehlender oder ungenügender Beschattung zeigt sich auch an der **Wyna** in der Gemeinde Gontenschwil (Abbildung 29). Die am Eingang in den Abschnitt mit 22.2°C bereits recht hohe Wassertemperatur steigt im Verlauf der 2000 m langen Strecke

weiter auf 24.6°C ($\Delta T = +2.4^\circ\text{C}$) und liegt damit nur noch knapp unter der für Bachforellen und Äschen tödlichen Temperatur von 25°C (vgl. Kap. 1).

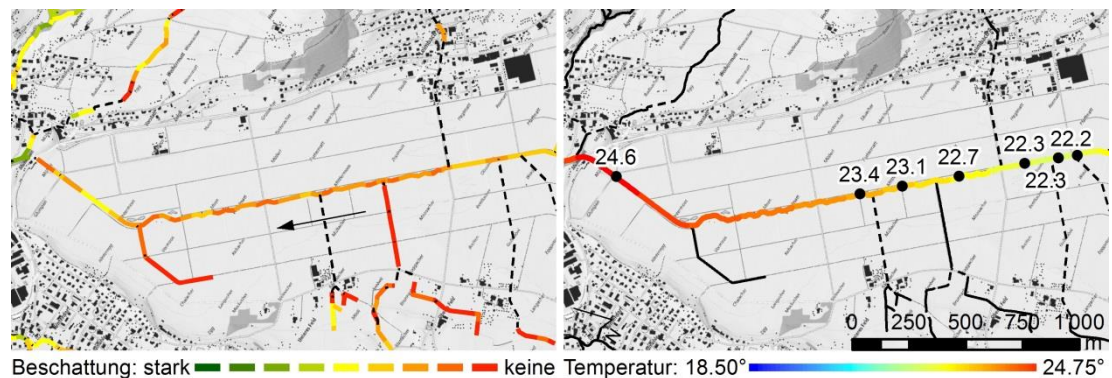


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur in der Wyna bei Gontenschwil (rechts) am 26.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C). Starke Beschattung = 100%, keine Beschattung = 0%.

Genügende bis starke Beschattung

Eine genügende bis starke Beschattung (gelb – dunkelgrün gemäss Beschattungskarte Kt. AG, entsprechen 50 – 100 % Beschattung) kann zu einer markanten Abkühlung des Gewässers führen, wie dies das Beispiel des Erusbachs zeigt (Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 34). Auf einer Länge von 1'220m kühlt er sich auf einem genügend beschatteten Abschnitt zunächst leicht von 20.1 auf 19.6°C ab ($\Delta T = -0.7^\circ\text{C}$). Der anschliessende Abschnitt von 320m Länge im Wald mit starker Beschattung führt sogar zu einer weiteren Abkühlung um $\Delta T = -3.8^\circ\text{C}$ auf 15.8°C. Es ist möglich, dass an dieser Stelle ein Grundwasserzuström mitverantwortlich ist an der starken Abkühlung.

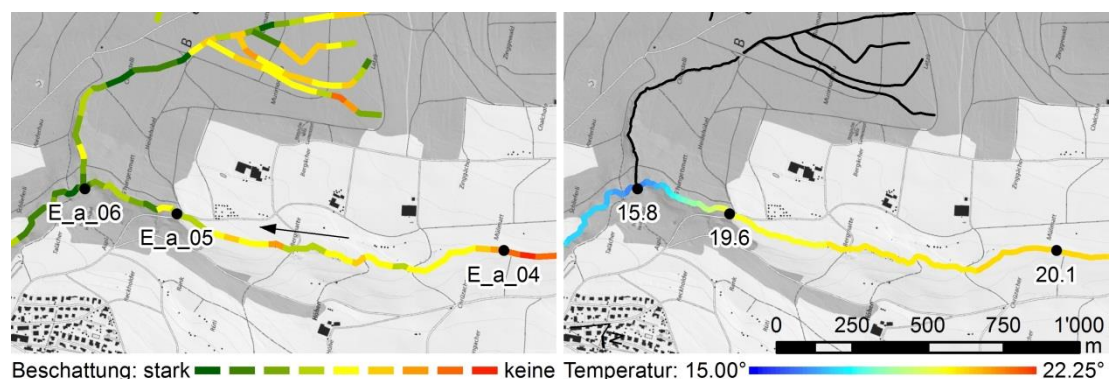


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur im Erusbach (rechts) zwischen Bettwil und Sarmenstorf am 24.7.2019 um 18:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).

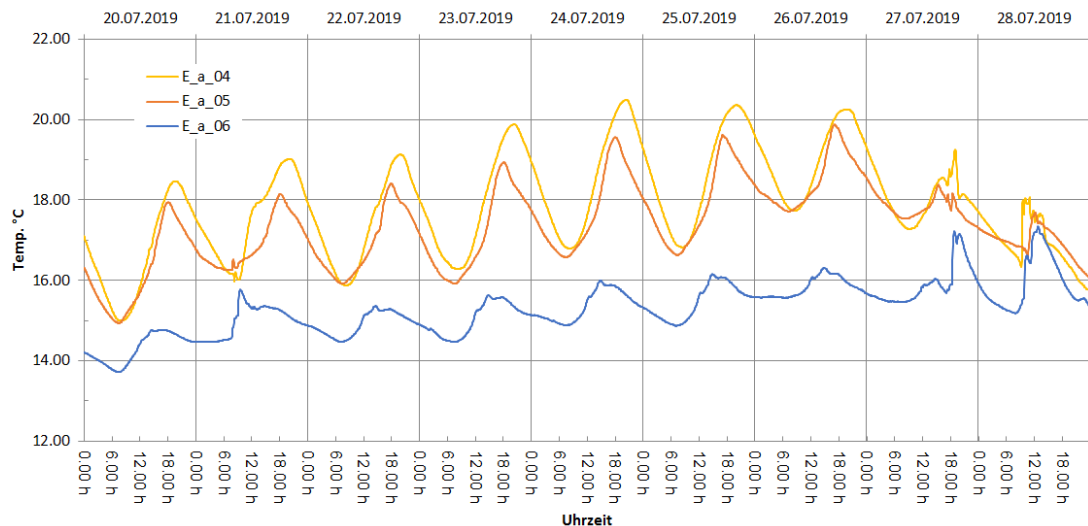


Abbildung 31: Zeitlicher Temperaturverlauf im Erusbach an den Messpunkten E_a_04 bis E_a_06

Ein weiteres Beispiel zur Beschattungswirkung findet sich an der Wyna in den Gemeinden Gontenschwil und Oberkulm. Im zunächst mehrheitlich genügend (gelb) beschatteten Abschnitt der Wyna stabilisiert sich die Temperatur und nimmt geringfügig von 24.4 auf 24.1°C um 0.3°C ab. Erst mit zunehmender Beschattung (mehrheitlich hellgrün) im folgenden Abschnitt (Länge ca. 1600 m) ist eine deutlichere Abnahme der Wassertemperatur um weitere 1.2°C auf 23.1°C zu verzeichnen (Abbildung 32).

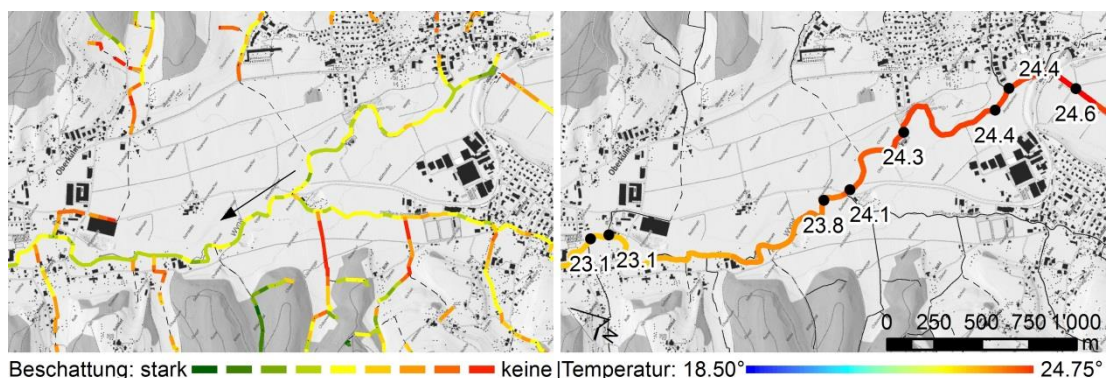


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur in der Wyna (rechts) bei Gontenschwil und Oberkulm am 26.7.2019 um 18:00 (Temperatur-Angaben in °C).

Ähnliche beschattungsbedingte Abkühlungen in Fließrichtung konnten auch an den anderen kleineren Untersuchungsgewässern nachgewiesen werden, so z.B. an der Jonen, wo die Wassertemperatur auf einer ca. 2 km langen, mehrheitlich stark beschatteten Strecke von 24.3 auf 22.4°C ($\Delta T = -1.9^\circ\text{C}$) abnahm (Abbildung 33).

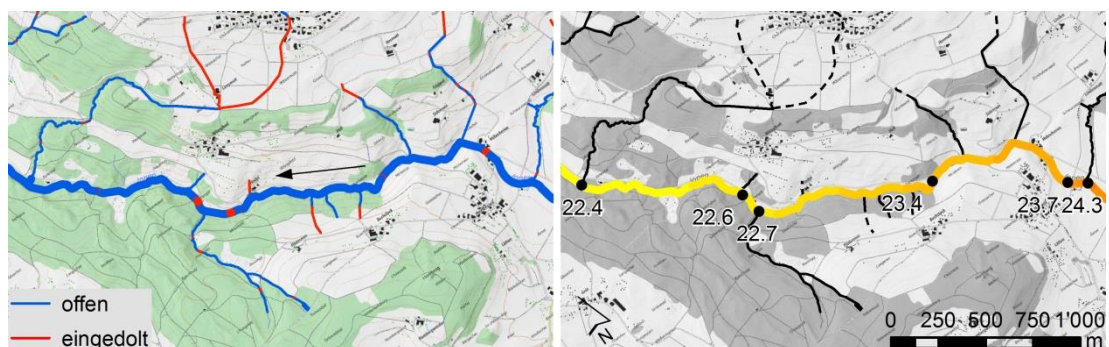


Abbildung 33: Jonen am 26.7.2019 um 16:00 Uhr (Temperatur-Angaben in °C).

Für die Aargauer Gewässer Erusbach und Wyna wurde die Korrelation zwischen dem Beschattungsgrad (gemäss Beschattungskarte des Kt. AG) und der Wassertemperatur berechnet. Hierbei ist anzumerken, dass nur der Beschattungsgrad am Messpunkt selbst in der Analyse berücksichtigt werden konnte, d.h. Einflüsse der oberhalb liegenden Strecke wurden nicht erfasst. Für den Erusbach konnte ein positiver Zusammenhang zwischen dem Beschattungsgrad und der Temperatur um 16:00 Uhr, wo annähernd die höchsten Temperaturen auftraten, nachgewiesen werden (Korrelationskoeffizient = 0.68, Signifikanzniveau < 0.05; vgl. Abbildung 34). Dies untermauert die These, dass bei kleineren Gewässern vor allem die lokalen Verhältnisse unmittelbar beim Messpunkt einen Einfluss auf die Wassertemperatur haben und der Wärmetransport (Temperaturdrift; Kap. 5.3) von untergeordneter Bedeutung ist.

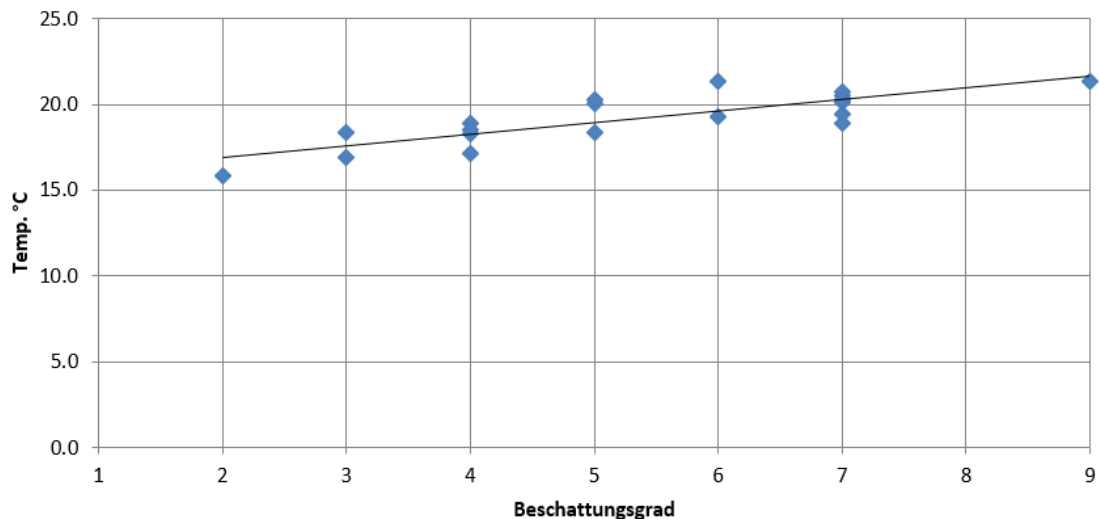


Abbildung 34: Lineare Regression für die gemessene Wassertemperatur des Erusbach um 16 Uhr in Abhängigkeit des Beschattungsgrads beim Messpunkt gemäss Beschattungskarte des Kt. AG (1 = starke Beschattung; 9 = keine Beschattung). Das Bestimmtheitsmass liegt bei 68% und zeigt eine relativ hohe Anpassung der Regression an die Datenpunkte (Signifikanzniveau < 0.05).

Für die Wyna konnte kein statistischer Zusammenhang zwischen Beschattungsgrad und Wassertemperatur festgestellt werden. Dies liegt daran, dass die Einflussfaktoren, insbesondere die «wasserkühlenden» Eindolungen in den Siedlungsgebieten, bei der Wyna sehr kleinräumig wechseln und daher der Einflussfaktor Beschattung am Messpunkt selbst oft nicht typisch ist. Dies ist z.B. der Fall, wenn beim Messpunkt eine eher kühle Temperatur gemessen wird, weil die Wyna unmittelbar aus einer Eindolung austritt, obwohl beim Messpunkt selbst keine Vegetation (Beschattung) vorhanden ist.

5.4.2 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 stark von der Temperatur des angrenzenden Erdreichs dominiert.

Die starke, mit Eindolungen verbundene Abkühlung lässt sich anhand der Messung direkt unterhalb der 600 m langen Eindolung am Perimeterbeginn der Jonen (hier noch Mülibach) feststellen (vgl. Abbildung 28). Der Auslauf aus der Eindolung stellt mit Abstand den kühlfsten Bereich im 20 km langen Perimeter dar. Auffällig ist auch, dass die Temperatur am Auslauf im Tagesverlauf nahezu konstant ist ($\Delta T_{24h} = 1.2^{\circ}\text{C}$). Die Temperatur oberhalb der Eindolung wurde jedoch nicht gemessen, weshalb keine Aussage zur Temperaturminderung innerhalb der Eindolung möglich ist.

Quantifiziert werden konnte die Wirkung einer Eindolung im oberen, landwirtschaftlich geprägten Projektperimeter des Erusbachs (Abbildung 35). In der rund 500 m langen Eindolung kühlte sich das Wasser um bis zu $\Delta T = -3.3^{\circ}\text{C}$ ab.

Die Temperaturschwankung im Tagesverlauf ist am Auslauf dieser Eindolung mit $\Delta T_{24h} = 3.3^{\circ}\text{C}$ etwas grösser als in der Jonen (Mülibach). Dies liegt vermutlich daran, dass sich der kleinere Abfluss des Erusbachs stärker und schneller erwärmt als der grössere Abfluss der Jonen.

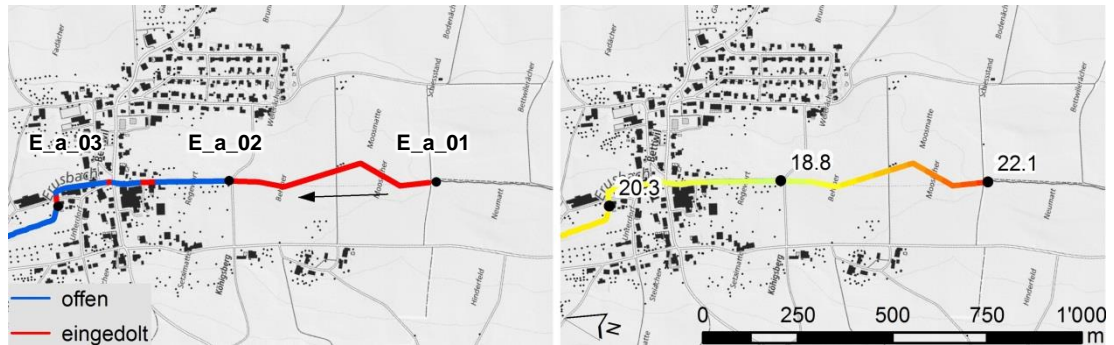


Abbildung 35: Erusbach am 24.7.2019 um 16:00. Linke Abbildung: rot = eingedolt (Temperatur-Angaben in $^{\circ}\text{C}$).

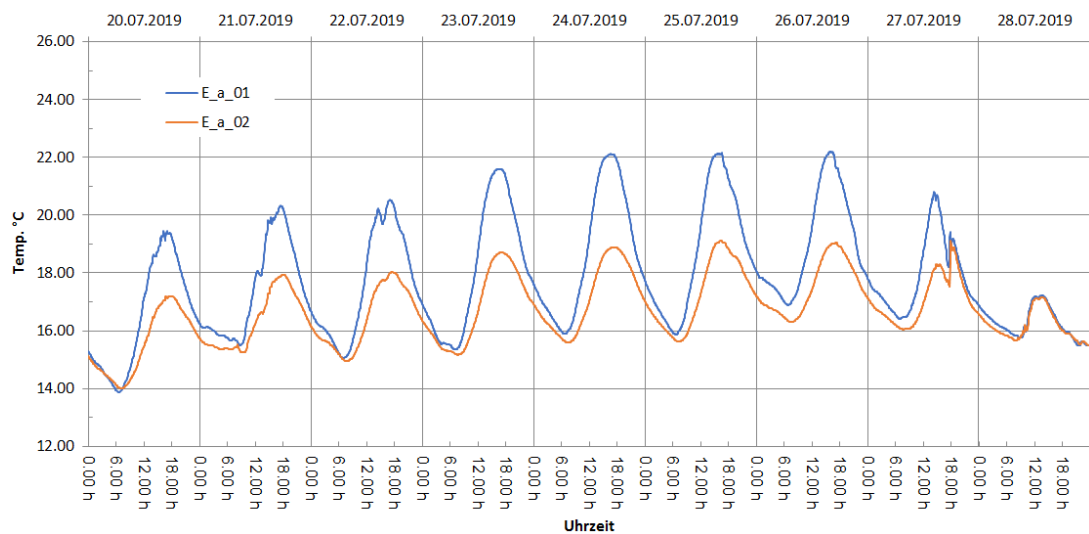


Abbildung 36: Zeitlicher Temperaturverlauf im Erusbach ober- und unterhalb der 500m langen Eindolung oberhalb von Bettwil.

Im Bereich der untersuchten Ortslagen fand in den Eindolungen eher eine leichte Erwärmung statt (Abbildung 37 und Abbildung 38). Dies liegt vermutlich daran, dass Eindolungen im Landwirtschaftsgebiet von Erdreich überdeckt und somit kühler als Eindolungen im Siedlungsgebiet sind, die sich in der Regel unter stark sich erwärmenden Strassen befinden. Zudem ist auch die Luft in aufgeheizten Ortslagen meist noch wärmer als im Landwirtschaftsgebiet. Die Wassertemperatur in den beiden weitgehend eingedolten Gewässerabschnitten in den Ortslagen von Sarmenstorf (Erusbach) und Menziken (Wyna) erwärmte sich geringfügig und lag bei $\Delta T = +0.8^{\circ}\text{C}$ (Abschnitt Erusbach L = 600m) bzw. $\Delta T = +0.9^{\circ}\text{C}$ (Abschnitt Wyna L = 1100 m).



Abbildung 37: Erusbach am 24.7.2019 (18:00 Uhr) in Sarmenstorf (Temperatur-Angaben in $^{\circ}\text{C}$).

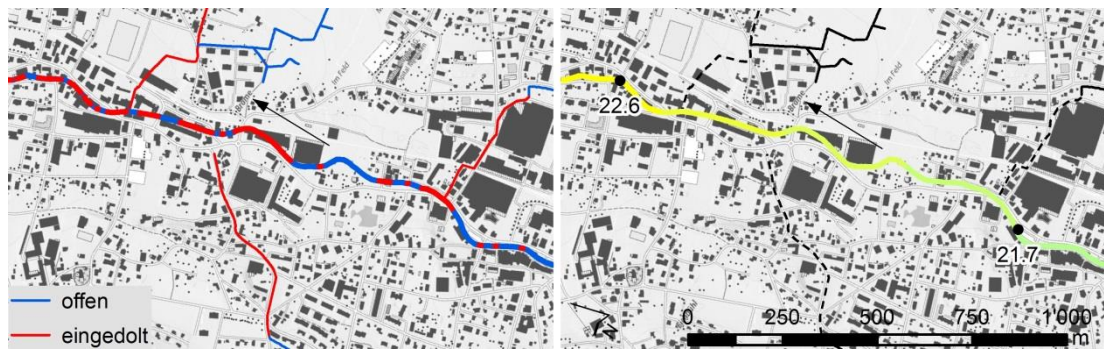


Abbildung 38: Wyna am 26.7.2019 (18:00 Uhr) in Menziken / Reinach (Temperatur-Angaben in °C).

5.4.3 Zuflüsse

5.4.3.1 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 eigenen Messungen in der Wyna und Jonen zeigen, lag die Wassertemperatur dieser beiden Gewässer unterhalb der ARA-Zuflüsse meist leicht, d.h. um bis zu ca. 1°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) bzw. $\Delta T \approx -0.5^{\circ}\text{C}$ (Jonen, Zeitraum 24. – 26.07.2019) nachgewiesen werden.

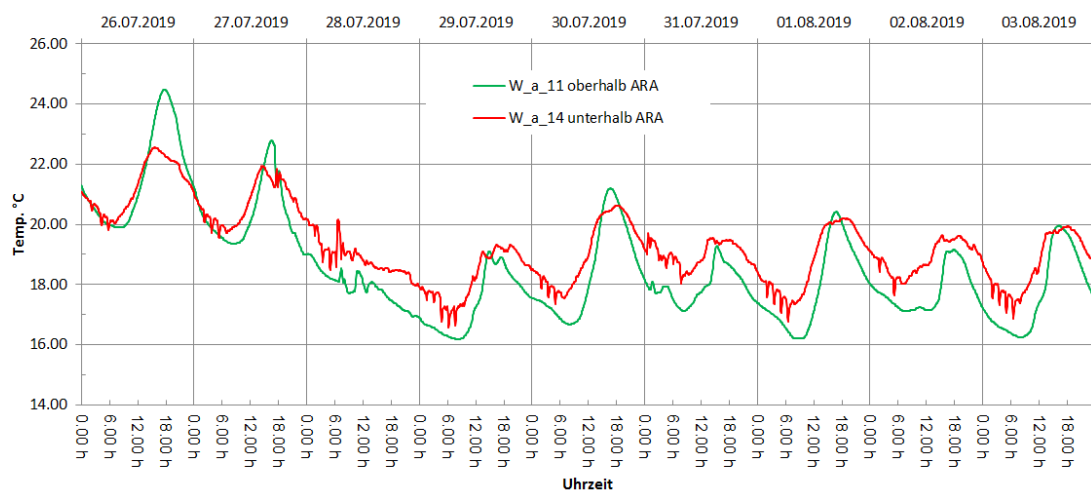


Abbildung 39: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Wyna oberhalb und unterhalb der Kläranlage Reinach.

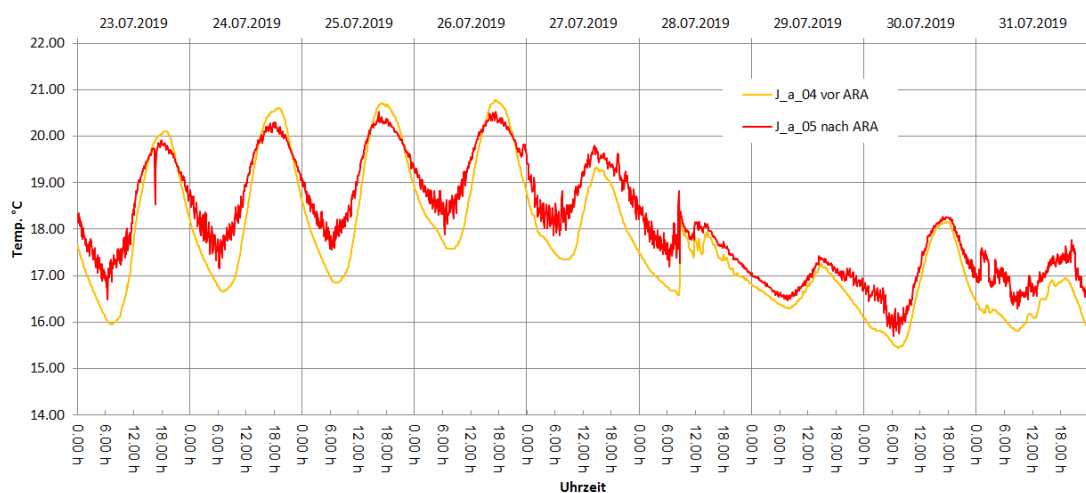


Abbildung 40: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Jonen oberhalb und unterhalb der Kläranlage Hausen.

5.4.3.2 Seitenbäche

Ob und in welchem Masse ein Seitenbach zu einer Erwärmung oder Abkühlung des Hauptgewässers führt, hängt von seiner Wassertemperatur und seinem Abfluss im Verhältnis zum Abfluss und der Temperatur des Hauptgewässers ab. Insbesondere grössere Seitenbäche können einen 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 41 und Abbildung 42) 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. $\Delta T = \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

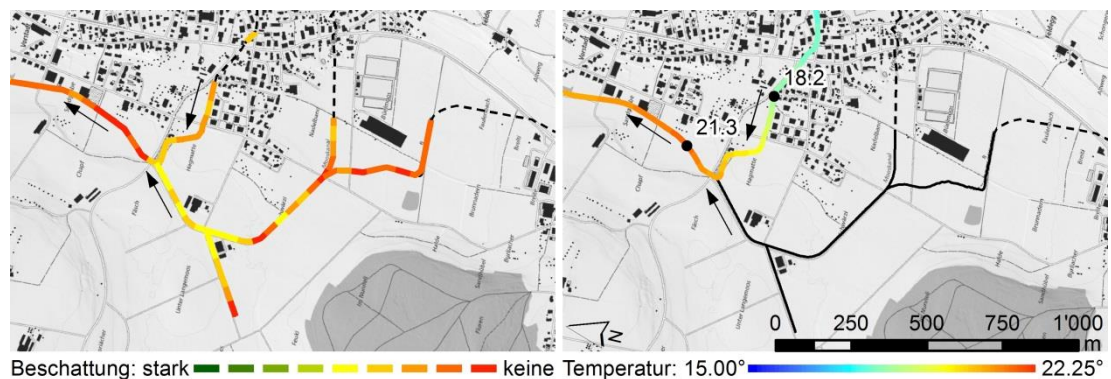


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau und der Wassertemperatur im Erusbach bei Sarmenstorf am 24.7.2019 um 16:00. Der Mooskanal mündet von unten (Pfeil) in den Erusbach. Die Messung 18.2°C entspricht dem Messpunkt E_a_09, die Messung 21.3°C dem Messpunkt E_a_11.

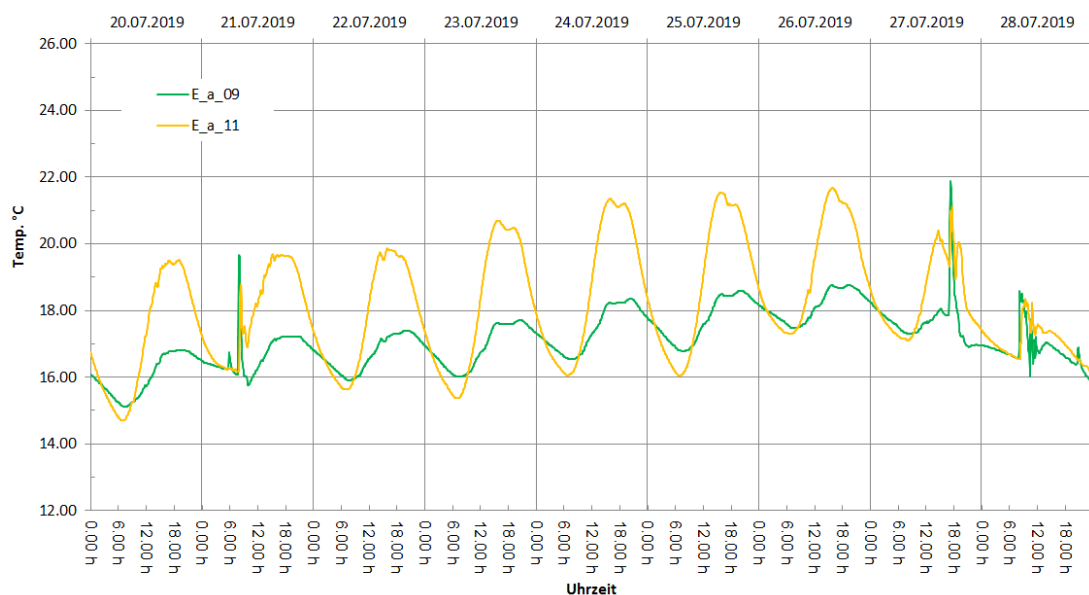


Abbildung 42: Erusbach vor (E_a_09) und nach (E_a_11) dem Zusammenfluss mit dem Moosbach.

5.4.3.3 Grundwasser

Der Einfluss von Grundwasser auf die Wassertemperatur konnte nicht explizit untersucht werden, da sich die Lage und insbesondere Tiefe der Grundwasserkörper aus Kartenwerken nicht unmittelbar ableiten lässt. 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 Sarmenstorf könnten exfiltrierende Grundwasserverhältnisse eine plausible Erklärung sein, 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.

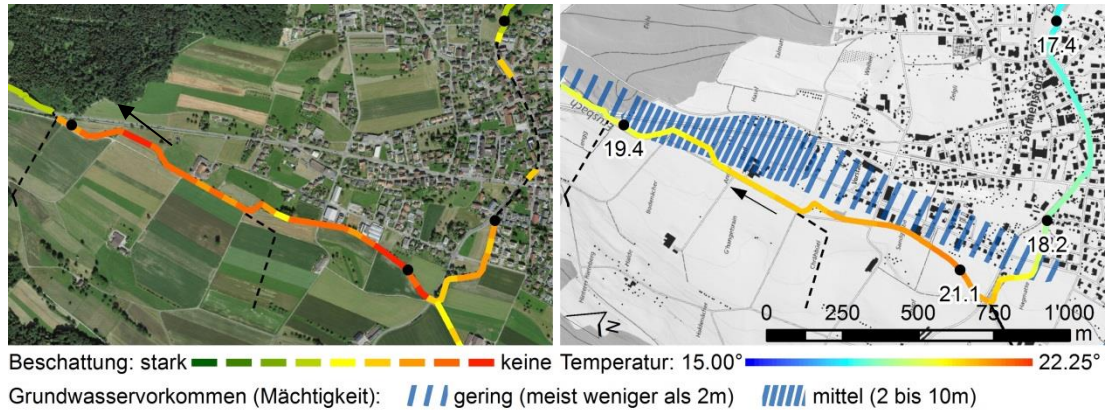


Abbildung 43: Erusbach am 24.7.2019 (18:00) unterhalb der Gemeinde Sarmenstorf (Temperatur-Angaben in $^\circ\text{C}$).

5.4.3.4 Wasserrückgaben von Ausleitungskraftwerken

Von den untersuchten Gewässern ist die Sihl das einzige mit einer Wasserkraftnutzung im Untersuchungsperimeter. Hinsichtlich der Wassertemperatur ist der Einfluss des Wasserkraftwerks Waldhalde bei Hütten besonders auffällig. Auf der 4.5 km langen Restwasserstrecke (km 4.8, Abbildung 19) 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 $^\circ\text{C}$ ($\Delta T = +4.7^\circ\text{C}$; Abbildung 44). Mit der Wasserrückgabe erfolgt eine plötzliche Abkühlung auf 19.8 $^\circ\text{C}$ ($\Delta T = -3.8^\circ\text{C}$). Der Temperaturanstieg in Fließrichtung ist unterhalb der Wasserrückgabe weit weniger ausgeprägt als in der Restwasserstrecke. Er beträgt bis zum nächsten Messpunkt (Abschnittslänge 6.4 km, $T = 21.7^\circ\text{C}$) trotz ähnlicher Morphologie und Beschattung nur $\Delta T = +1.9^\circ\text{C}$. Der geringe Abfluss in der Restwasserstrecke und die damit verbundene kleine Wassertiefe haben somit einen deutlichen (erwärmenden) Einfluss auf die Wassertemperatur.

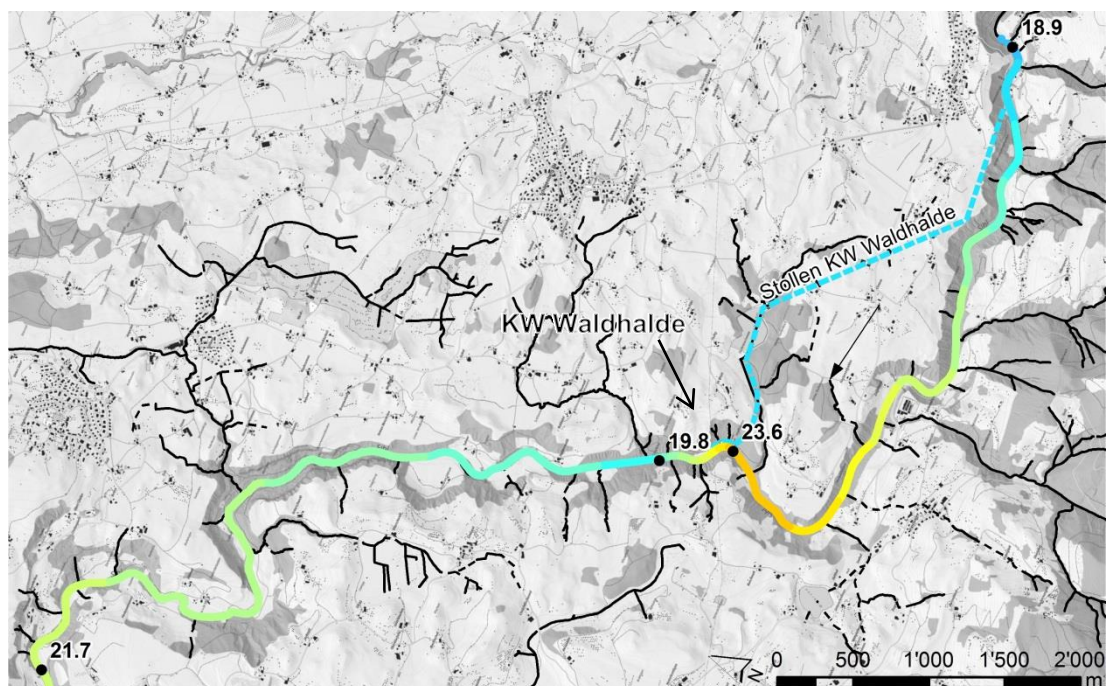


Abbildung 44: Sihl am 9.8.2019 (16:00 Uhr) auf dem oberen Projektabschnitt zwischen Hütten und Hirzel (Temperatur-Angaben in $^\circ\text{C}$).

5.4.4 Gewässerumfeld: Siedlungsgebiet / Offenland / Wald

Aufgrund der Zusammenwirkung 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 30). 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 Ortslage im Unterschied zum Offenland oft eingedolt und somit stark beschattet waren (vgl. auch Kap. 5.4.2). Dies lässt vermuten, dass sich Gewässer bei gleichem Beschattungsgrad in Ortslagen stärker erwärmen als im Offenland.

Diese Beobachtungen sind vermutlich auf unterschiedliche Lufttemperaturen in den verschiedenen Umfeldern zurückzuführen, die wiederum einen Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Wälder und insbesondere Laubwälder sind hingegen durch die Schattenwirkung und Evapotranspiration der Bäume an Hitzetagen unter dem Blätterdach um im Schnitt 4°C kühler als ihr offenes Umland (WSL 2019, s.a. Kap. 2.2.1). 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 mit wenig Vegetation.

5.4.5 Gewässerstruktur

5.4.5.1 Naturnah vs. begradigt

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. 5.4.3.4) 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 (Kap. 2.3). In Hitzeperioden, die meist mit Niedrigwasserabflüssen einhergehen, verteilt sich das wenige Wasser ebenfalls über eine, für diesen Abfluss unnatürlich grosse Sohlenbreite und erwärmt sich verstärkt. Ob dieser Effekt ähnlich ausgeprägt ist wie in der Restwasserstrecke der Sihl ($\Delta T = + 4.7^\circ\text{C}$ auf 4500 m Länge; Kap. 5.4.3.4), 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 als unstrukturierte, breite Gerinne. Der Einfluss der Gewässerstruktur gewinnt damit an Bedeutung, je weniger das Gewässer beschattet ist.

5.4.6 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 11). 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 einer unmittelbar unterhalb des Biberdamms installiert (vgl. Abbildung 46, Abbildung 48

und Abbildung 49). Somit wurde immer die Temperatur im Fließgewässer und nicht diejenige im eingestauten Bibersee gemessen.

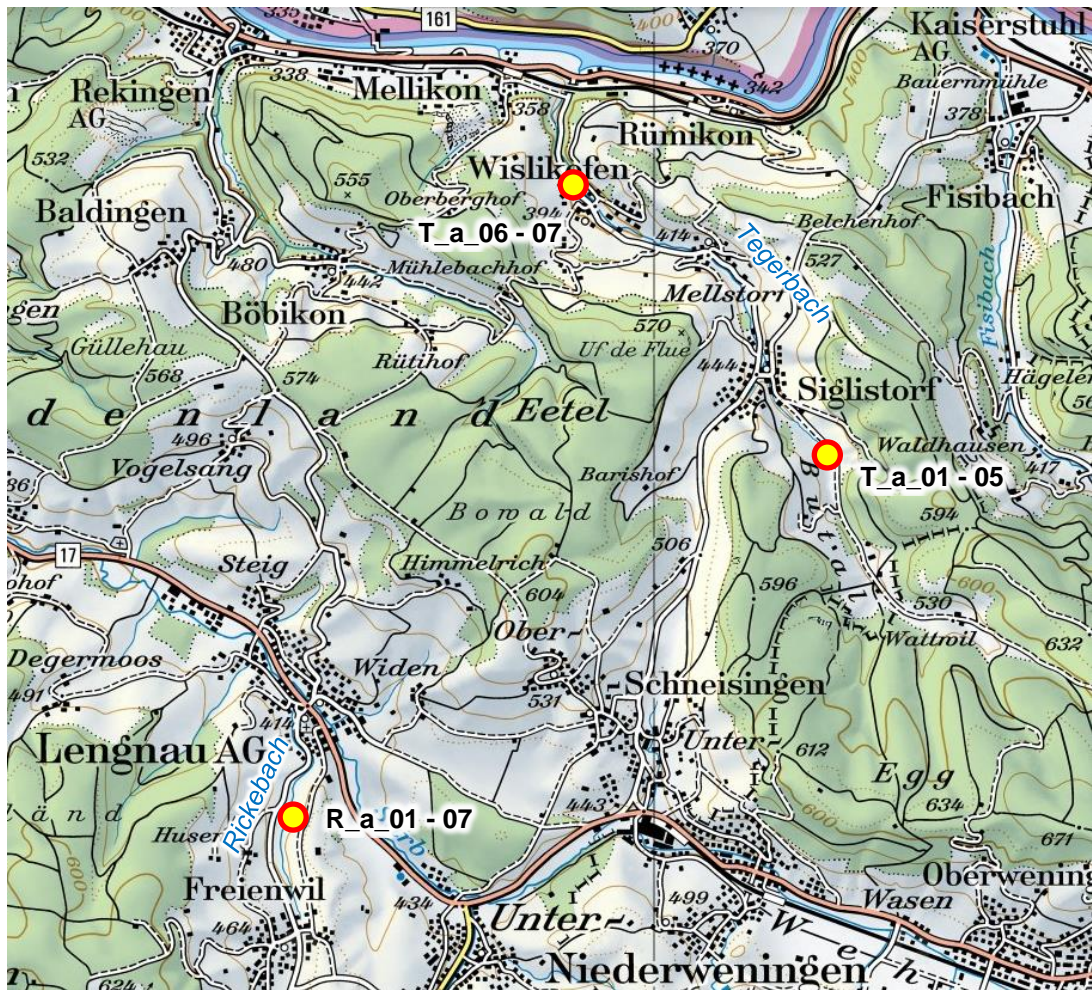


Abbildung 45: Übersicht der Mess-Standorte am Rickenbach und am Tegerbach (Quelle: swisstopo).

Rickenbach

Oberhalb der Gemeinde Lengnau wurde eine Abfolge von drei Biberdämmen im Rickenbach untersucht.

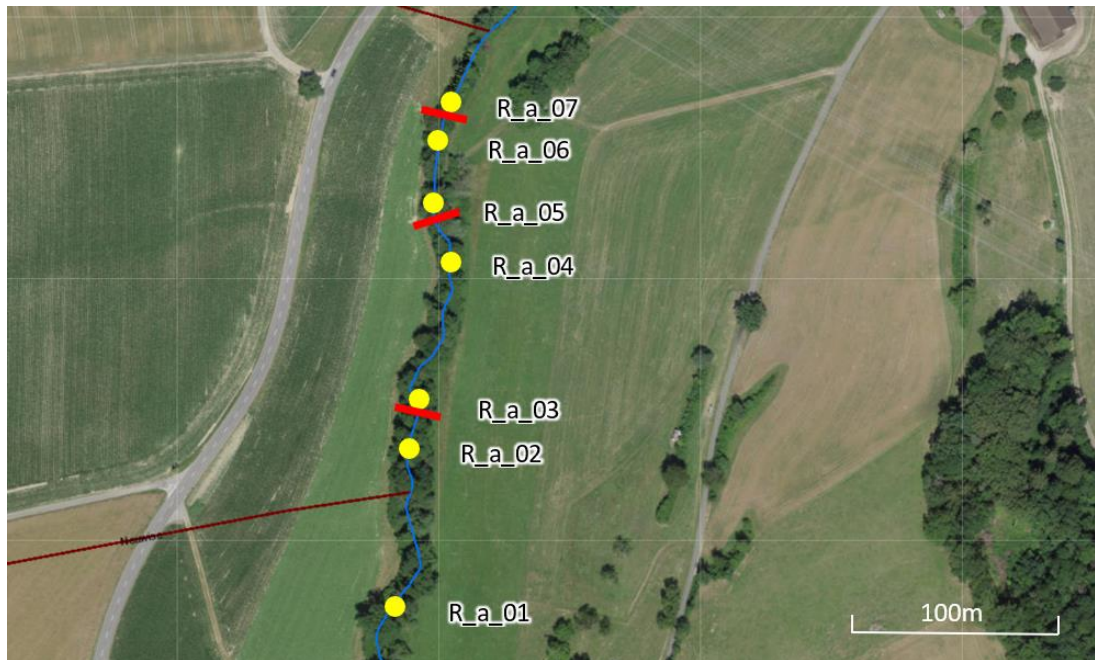


Abbildung 46: Rickebach mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).

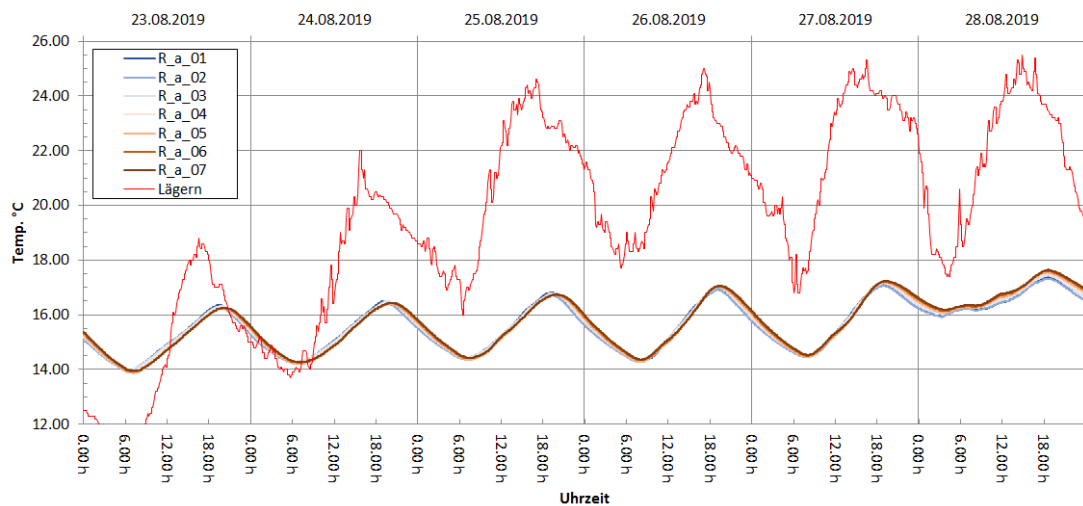


Abbildung 47: Temperaturverlauf im Rickebach im Bereich der Biberdämme. Die rote Datenkurve entspricht der Messstation Lägern (Lufttemperatur).

Die Messresultate zeigen für den Rickebach keine klare Temperaturveränderung in der Abfolge der Biberbauten. Auch unterhalb des untersten Biberdamms in der unbeeinflussten Bachstrecke ist keine Temperaturveränderung feststellbar.

Tegerbach

Oberhalb der Gemeinde Siglistorf wurde im Tegerbach eine Abfolge von zwei Biberdämmen und unterhalb von Wislikofen ein Biberdamm untersucht.

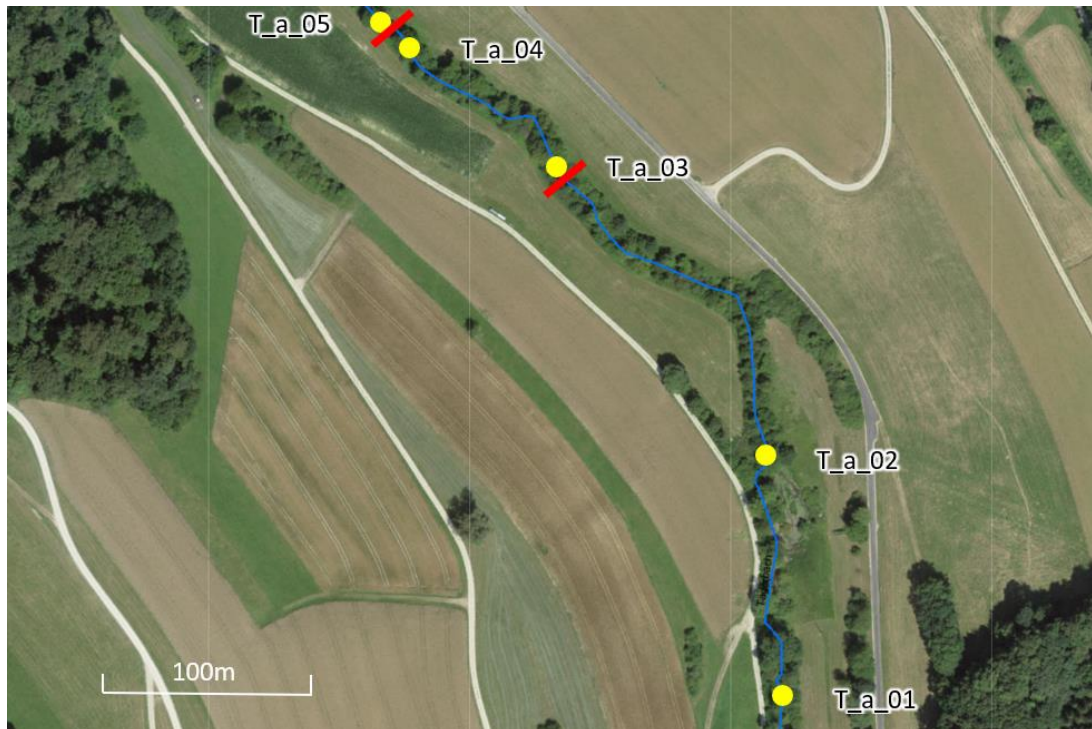


Abbildung 48: Tegerbach oberhalb von Siglistorf mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).

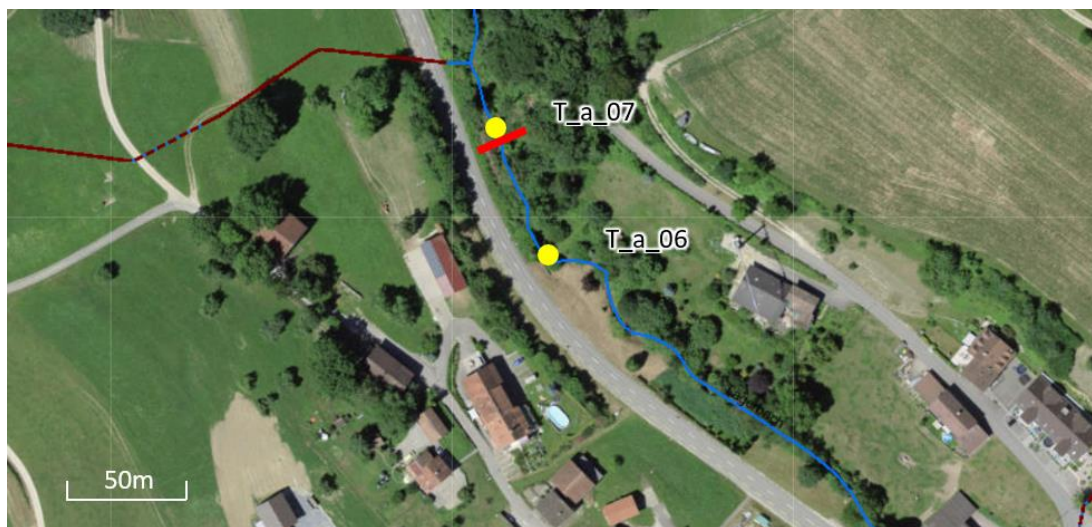


Abbildung 49: Tegerbach unterhalb von Wislikofen mit den Standorten der Biberdämme (rote Balken) und den Messpositionen der Datenlogger (Quelle: AGIS).

Oberhalb Siglistorf (T_a_01 - 05):

Das Wasser erwärmt sich im Bereich des ersten Biberdamms zwischen den Messpunkten T_a_01 bis T_a_03 nicht signifikant messbar. Unterhalb des ersten Biberdamms bis zur Stauwurzel des zweiten Biberdamms passiert folgendes: Das Wasser bei den Messpunkten T_a_04 und T_a_05 erwärmt sich in den Morgenstunden bis ca. 15 Uhr stärker als bei den oberhalb liegenden Messpunkten T_a_01 bis T_a_03. Ab ca. 15 Uhr erwärmt sich das Wasser beim Messpunkt T_a_04 bei der Stauwurzel des unteren Damms bis ca. 18 Uhr nicht mehr und beim Messpunkt T_a_05 im Vergleich zu den Messpunkten T_a_01 - 03 deutlich weniger. Der Prozess der abendlichen Abkühlung verläuft bei den Messpunkten T_a_04 und T_a_05 ebenfalls zeitlich vorgezogen gegenüber den Messpunkten T_a_01 - 03. Dies deutet darauf hin, dass der Grund für die tieferen Wassertemperaturen bei den Messpunkten T_a_04 und T_a_05 nicht in einer Abkühlung des Wassers in Fließverlauf liegt,

sondern vermutlich auf lokale Gegebenheiten zurückzuführen ist wie zum Beispiel eine stärkere Beschattung insbesondere in den Stunden der stärksten Erwärmung.

Die Temperaturkurven zeigen im Wesentlichen einen sinusförmigen Verlauf. Die genauere Betrachtung offenbart allerdings individuelle Verläufe mit Unregelmässigkeiten, Knicken und zeitlich unterschiedlichen Maximal- resp. Minimalwerten, was ebenfalls auf lokale Einflussfaktoren (Beschattung je nach Sonneneinfall) schliessen lässt. Die täglichen Kurvenformen zeigen einen charakteristischen Verlauf, der sich wiederholt. Auch diese Erscheinung stützt die These nach dem starken Einfluss lokaler Faktoren, vermutlich der Beschattung.

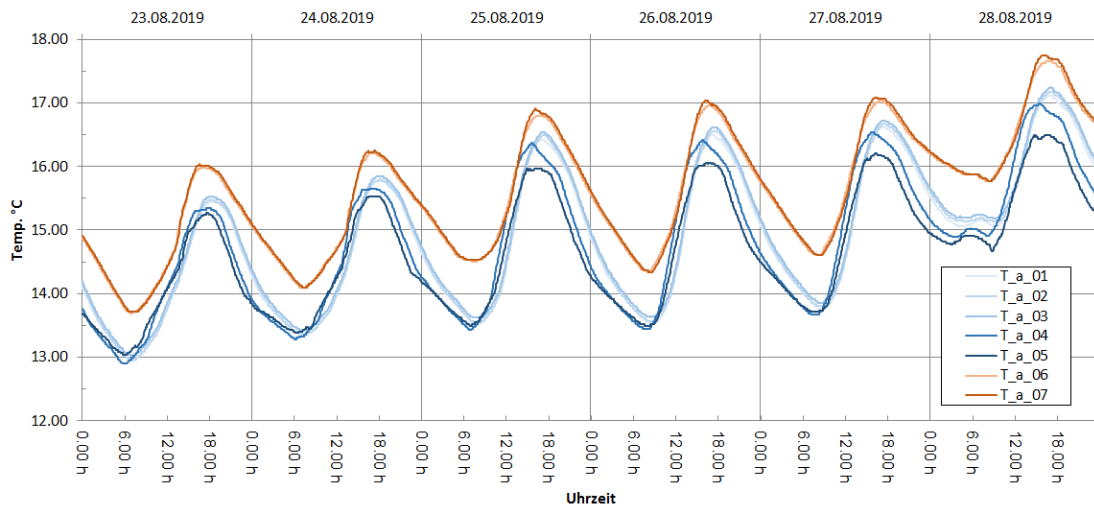


Abbildung 50: Temperaturverlauf im Tegerbach im Bereich der Biberdämme (Datenlogger T_a_01 - T_a_05: Standorte oberhalb von Siglistorf; Datenlogger T_a_06 / T_a_07 Standorte unterhalb von Wislikofen).

Da sich das Wasser im Bereich der Biberbauten zurückstaut und sich stehende Kleingewässer bilden, wäre eher eine Temperaturerhöhung im Gewässerverlauf zu erwarten. Die Temperaturkurven zeigen jedoch eine Temperaturabnahme im Fließverlauf. Auch dies deutet auf den kühlenden Einfluss der Bestockung entlang des untersuchten Bachabschnitts hin.

Unterhalb Wislikofen (T_a_06 - 07):

Der Biberdamm zwischen den eingesetzten Temperaturloggern T_a_06 (Stauwurzel) und T_a_07 (unmittelbar unterhalb des Damms) scheint keinen nennenswerten Einfluss auf die Temperatur des Tegerbachs zu haben. Das Wasser erwärmt sich kaum messbar ($\Delta T = +0.1^\circ\text{C} \gg$ innerhalb Messgenauigkeit).

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kann kein ursächlicher Zusammenhang zwischen einem Biberdamm und der Wassertemperatur festgestellt werden.

5.5 Fazit

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnten erstmals gemessene Wassertemperaturen im gesamten Längsverlauf mehrerer Gewässer quantifiziert und dargestellt werden. Die Resultate der Messungen erlauben folgende Aussagen:

- Bei allen untersuchten Fließgewässern zeigt sich ein **genereller positiver Temperaturgradient im Fließverlauf**.

- Kleine bis mittelgrosse Fließgewässer (Erusbach, Jonen, Wyna) zeigen im Tagesverlauf eine **Temperaturamplitude von 1.5 - 5°C**, die Sihl als mittelgrosser Fluss von 1.5 - 8.8°C. Die Orte mit den höchsten Tagestemperaturen korrespondieren mit den grössten Temperaturamplituden.
- Nach Tagen mit sehr hohen Tagestemperaturen («Hotspots») folgt tags drauf eine relativ hohe Morgentemperatur und damit eine eher hohe Ausgangstemperatur für den neuen Tag, was an warmen oder heissen Tagen die Entstehung hoher Tagestemperaturen begünstigt.
- Eine **Temperaturdrift**, d.h. die Verlagerung eines Wasserpakets 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 folglich von untergeordneter Bedeutung, weil er von anderen Faktoren (Beschattung) überlagert wird. Bei grösseren Fließgewässern (Sihl) findet infolge des Massentransports eine kontinuierliche Temperaturzunahme in Fließrichtung statt.
- Die **kleinen und mittelgrossen, untersuchten Fließgewässer** (Erusbach, Jonen, Wyna) zeigen einen **sehr heterogenen Temperaturverlauf**. Die Temperatur steigt und fällt relativ kleinräumig in **Abhängigkeit von lokalen Einflussfaktoren**. Dies lässt auch erwarten, dass der nachgewiesene positive Temperaturgradient mit entsprechenden Massnahmen durchaus umgekehrt (d.h. Abkühlung in Fließrichtung) oder zumindest stark verringert werden kann.

Die **Temperatur grosser Fließgewässer ist aufgrund der Temperaturdrift weniger von lokalen Faktoren** (z.B. kleinräumiger Beschattung) **abhängig**.

- Bei den kleinen und mittelgrossen Fließgewässern ist der **Grad der Beschattung der wichtigste Einflussfaktor auf die Wassertemperatur**. Dies konnte mittels einer Korrelationsanalyse bestätigt werden, die einen positiven Zusammenhang zwischen dem Beschattungsgrad und der Temperatur zeigt.
 - **Wenig oder unbeschattete Gewässerabschnitte** führten an allen untersuchten Gewässern zu einer **deutlichen Zunahme der Wassertemperatur**. Diese betrug bis zu $\Delta T = +3.9^\circ\text{C}$ auf 1.1 km Gewässerlänge bei vergleichsweise tiefer Eingangstemperatur bzw. bis zu $\Delta T = +2.4^\circ\text{C}$ auf 2.1 km Gewässerlänge bei einer mittleren Eingangstemperatur (Kap. 5.4.1). Längere wenig bis unbeschattete Abschnitte lagen an den untersuchten Gewässern nicht vor. Es ist davon auszugehen, dass bei längeren Abschnitten eine weitere Temperaturerhöhung auftritt.
 - Bei einer «**genügenden Beschattung**» (gelb gemäss Beschattungskarte des Kantons Aargau, d.h. ca. 50%) findet in Fließrichtung **keine nennenswerte Erhöhung der Wassertemperatur** statt ($\Delta T < +1^\circ\text{C}$).
 - Bei sehr hohen Eingangswerten kommt es im Verlauf ausreichend beschatteter Strecken zu leichter Abkühlung. Die **stärksten Abkühlungen** wurden bei **starker 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. 5.4.1).
 - Ähnlich ausgeprägte Abkühlungen konnten auch bei **Eindolungen** im Landwirtschaftsgebiet nachgewiesen werden, bei denen die Rohrleitung, im Unterschied zu oft oberflächennahen Eindolungen in erwärmten Ortslagen, vergleichsweise tief im kühleren Erdreich liegen. Die Abkühlung betrug hier bis zu $\Delta T = -3.3^\circ\text{C}$ auf 500 m Gewässerlänge (Kap. 5.4.2).
- Bei der **Sihl**, dem mit Sohlenbreiten von 30 - 50 m grössten untersuchten Fließgewässer, zeigte sich im Unterschied zu den kleineren eine weitgehend **kontinuierliche Zunahme der Wassertemperatur in Fließrichtung**. Dies ist vermutlich auf die Gewässergrösse (Massentransport) sowie auf den geringeren Einfluss der Beschattung infolge der relativ grossen Gewässerbite zurückzuführen, die nur noch eine Teilbeschattung zulässt. Möglich sind aber auch bei dieser Breite noch Beschattungsgrade von deutlich über 50% der Wasserfläche, wenn breitkronige Uferbäume direkt

an der Wasserlinie stehen. Dies ist an der Sihl jedoch nur selten der Fall. Zwar fließt sie grossteils durch teilweise walddreiche Gebiete (z.B. Sihlwald), im nahen Uferbereich (bis ca. 10-30 m landseitig der Wasserlinie) fehlt der Baumbewuchs jedoch häufig.

- Eine deutliche Unstetigkeit im Temperaturverlauf ergibt sich an der Sihl lediglich 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°C** (Kap. 5.4.3.1). Die **Maximaltemperaturen** wurden durch die Einleitungen jedoch **um bis zu $\Delta T = -2.0^\circ\text{C}$ gemindert**. Der Einfluss der untersuchten Kläranlagen auf die Wassertemperatur ist somit zumindest in Hitzeperioden eher positiv zu sehen. Grundsätzlich ist jedoch die generelle Temperaturerhöhung durch Kläranlagen kritisch zu sehen. Durch die generelle Erhöhung nimmt auch die Zahl der Tage mit relativ hohen Temperaturen zu, was u.a. das Auftreten von Krankheiten (proliferative Nierenkrankheit (PKD) ab 15°C ; vgl. Kap.1) fördert oder generell zur Schwächung der Fische durch Stress und Einstellen der Nahrungsaufnahme (Forelle ab ca. 19.5°) führen kann.
- Der Einfluss von **Grundwasserexfiltration** in das Gewässer wurde im Projekt nicht gezielt untersucht. In einem Abschnitt des Erusbachs, in dem trotz fehlender Beschattung eine Abkühlung von über 2°C auftritt, wird aber der Einfluss von Grundwasser vermutet (Kap. 5.4.3.3).
- Es konnte kein Einfluss von Biberdämmen in Gewässern auf die Wassertemperatur nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen decken sich damit weitgehend mit den Erfahrungen anderer Autoren (Kap. 2). Sie zeigen deutlich, dass auch in der Schweiz an kleinen und mittleren Gewässern eine Verringerung der Wassertemperaturen im Bereich von 4°C bis allenfalls sogar 5°C möglich ist, sofern die Gewässer stark beschattet und nach Möglichkeit von Wald oder einem breiten Gehölzstreifen umgeben sind. Damit wäre neben weiteren positiven Effekten auch der Erhalt bzw. die Entwicklung intakter Äschen- und Forellenpopulationen im Mittelland trotz Klimawandel grundsätzlich möglich.

Nicht gezeigt werden konnte, wie sich eine Massnahmenkombination der Beschattung mit Massnahmen im Gewässer (Kap. 2.3) und in der Fläche (Kap.2.4) auswirkt. Eine Quantifizierung des Einflusses von Massnahmenkombinationen ist daher nicht möglich. In Anbetracht der teilweise erheblichen Wirkung von Massnahmen im Gewässer und in der Fläche kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch Massnahmenkombinationen Abkühlungen von deutlich mehr als den oben genannten 5°C möglich sind.

6 Empfehlungen

Beschattung

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die grosse Bedeutung der Beschattung für die Wassertemperatur insbesondere kleiner und mittlerer Fließgewässer. Mit einer genügenden Beschattung gemäss Beschattungskarte (40 – 60% Beschattung) kann einer weiteren Erwärmung im Allgemeinen vorgebeugt werden, eine genügende bis starke Beschattung (60 – 100%) bewirkt eine Abkühlung. Insgesamt überschritt die Wassertemperatur aber an allen untersuchten Gewässern die für Forellen kritische Temperatur (19.5°C, Kap. 1). In weiten Strecken lagen die Tageshöchstwerte deutlich über 20°C und überschritten teilweise sogar die Letaltemperatur von Äsche und Bachforelle (25°C; Kap. 1). Lediglich im Erusbach wurde die kritische Temperatur über rund zwei Drittel des Untersuchungsgebiets dauerhaft unterschritten.

Eine relativ schnelle Verbesserung dieser heiklen Situation, die sich mit dem Klimawandel weiter verschärfen wird, ist auf weiten Strecken unserer Fließgewässer 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 (Kap. 2.2) 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. Reicht die durch die reine Beschattung der Wasserfläche erzielte Abkühlung nicht aus, sollten weitere Massnahmen in Erwägung gezogen werden. Neben Massnahmen im Gewässerbett und in der Fläche (Kap. 2.3 bzw. 2.4) kann auch der Gehölzsaum hinsichtlich seiner Kühlwirkung weiter «optimiert» werden (z.B. Verbreiterung des Gehölzstreifens).

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.

An grossen Fließgewässern wie der Sihl kann durch Ufergehölze «nur» eine Teilbeschattung erreicht werden. Auch die Beeinflussung der Faktoren Wind und Lufttemperatur ist gegenüber kleinen Gewässern reduziert. Ihr positiver Einfluss ist aber dennoch nicht zu vernachlässigen und sollte genutzt werden. Es wird daher empfohlen, an grossen Fließgewässern möglichst grosse, weit ausladende Bäume 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. Hierfür müssen die verantwortlichen und ausführenden Personen verstärkt sensibilisiert und ausgebildet werden.

Zusätzlich sollte die Beschattung bei Ausschreibungen von Planermandaten für Flussbauprojekte möglichst als Vorgabe definiert und in Merkblättern und Leitfäden verankert werden.

Gerinneform und -strukturierung

Die Wassererwärmung wird wesentlich durch die Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe beeinflusst (Kap. 2.3). 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 51). Hierbei ist folgendes zu beachten:

- Überströmte Einbauten sind gegenüber umströmten zu bevorzugen, da sie sich weniger erwärmen (vgl. Abbildung 51 links und rechts)
- Umströmte Einbauten oder Strukturen sollten aus Totholz bestehen und/oder bewachsen sein (vgl. Abbildung 9). 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. Insbesondere Totholzeinbauten können bei kleineren Gewässern auch durch interessierte Laien (z.B. im Rahmen «Fischer schaffen Lebensraum», Gründler & Mende 2020) umgesetzt werden.
- Das Niederwassergerinne sollte so angelegt werden, dass es über weite Strecken im Schatten verläuft (Sonnengang beachten).



Abbildung 51: Überströmte Lenkbuhnen zur Induzierung eines Niederwassergerinnes in der Kleinen Emme LU (links, Foto: L. Meier). Umströmte Blockbuhnen in der Tulln / Niederösterreich (rechts; Foto: EZB TB Zauner)

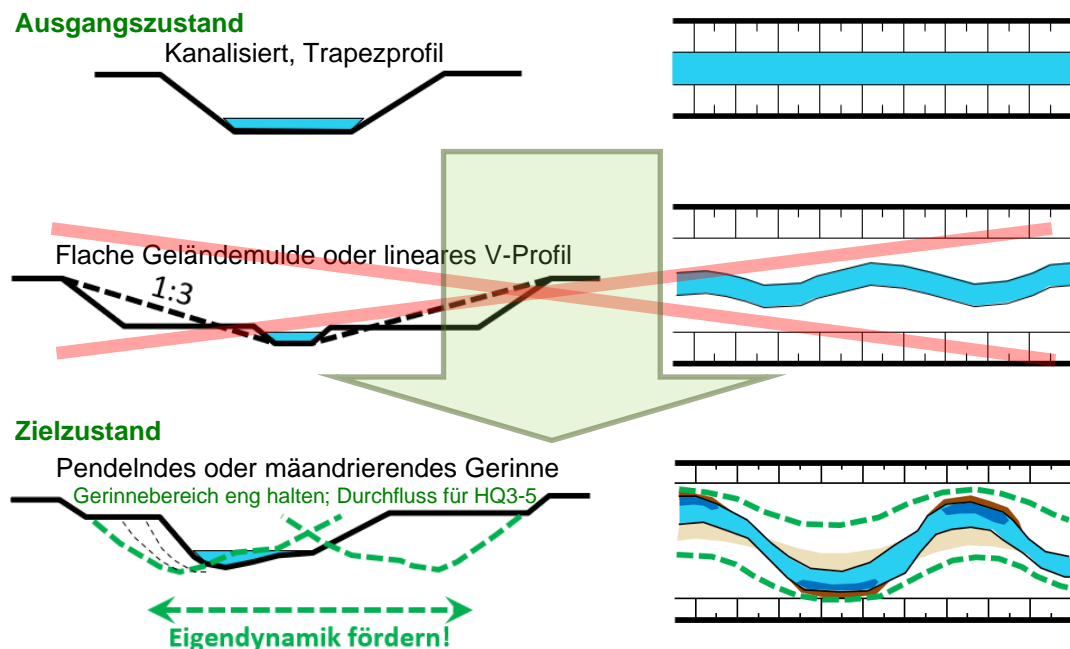


Abbildung 52: Strukturierung eines zu revitalisierenden Fließgewässers mit natürlicherweise mäandrierender Gerinneform. Das alte Trapezprofil wird innerhalb des neuen, breiteren Gewässerraums in ein mäandrierendes, gut strukturiertes und eigendynamisches Gerinne umgewandelt. Das Wasser fließt konzentriert im eher eng zu haltenden Niederwassergerinne (oder besser «Mittelwassergerinne») mit Prall- und Gleithangstrukturen ab. Durchgehende 1:3-Böschungen kommen in der Natur nicht vor.

Eine naturgemässe Gerinnegestaltung und -strukturierung verbessert die Vernetzung mit dem Grundwasserkörper und führt zu mehr Refugien für die aquatische Fauna.

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 (25°C, Kap. 1) 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 und keineswegs nur auf die Fließgewässertemperatur beschränkt ist (vgl. Kap. 2.4). Es werden folgende Massnahmen empfohlen:

- Kühlende, d.h. verdunstende Landschaftselemente sollten flächendeckend gefördert bzw. revitalisiert 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 Ortslagen (z.B. Gehölzpflanzungen, Fassaden-/Dachbegrünungen).
- Versiegelte Flächen sollten möglichst weitgehend entsiegelt und die Ableitung von Niederschlagswasser durch Versickerung oder Speicherung so weit wie möglich minimiert werden. Die damit verbundene Erhöhung der Bodenfeuchte und lokal auch der Grundwasserstände ermöglicht eine zunehmende Verdunstung durch Pflanzen und damit eine verstärkte Abkühlung.
- Die Versickerung ist auch in der offenen Landschaft und im Wald zu fördern (Massnahmen s. Kap. 2.4). Dies ist ebenso wie in den Ortslagen häufig mit vergleichsweise einfach umsetzbaren Massnahmen möglich und nutzt nicht zuletzt auch der Landwirtschaft (z.B. Verringerung von Bodenerosion, bessere Wasserverfügbarkeit begünstigt Pflanzenwachstum).

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.

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.
- Durance, I., Ormerod, S. J. (2007): Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Global Change Biology*, Nr. 13, S. 942–957, doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01340.x
- Davies-Colley, R. J., Payne, G., Van Elswijk, M. (2000): Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology*, Jg. 24, Nr. 3, S. 111 - 121
- Durance, I., Ormerod, S. J. (2007): Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Global change biology*, Jg. 13, Nr. 5, S. 942 - 957
- Durrer, S., Kirchhofer, A., Schälchli, U., Seippel, A., Sieber, P., Tesini, C. (2014): *Niederwassergerinne*. Hrsg. Kantone Luzern, Zürich, Aargau.
- 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
- Elliott, J. M., Hurley, M. A., Fryer, R. J. (1995). A new, improved growth model for brown trout, *Salmo trutta*. *Functional Ecology*, Nr. 9, S. 290–298.
- Gregory, S. V., Swanson, F. J., McKee, W. A., Cummins, K. W. (1991): An ecosystem perspective of riparian zones. *BioScience*, Vol. 41, Nr. 8, S. 540 - 551
- Gründler, S., Mende, M. (2020): *Fischer schaffen Lebensraum, Instream Restaurieren, Gewässeraufwertung mit einfachen Massnahmen*. Schweizerischer Fischerei-Verband SFV. 2. Auflage, 124 S. + Anhang
- Hintermann & Weber AG (2019): *Uferbestockung Fließgewässer Aargau. Hinweiskarte Beschattung. Methoden- und Ergebnisbericht*.
- Hoffmann (2011). *Ableitung einer Orientierungskurve Temperaturregime für den guten ökologischen Zustand der Unteren Wupper*. Gutachten. Zitiert in *Wupperverband (2011): 2.4 Wärmehaushalt und Temperaturregime*, 16 S.
- Johnson, S. L. (2004): Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Jg. 61, S. 913-923.
- Johnson, S., J. A. Jones (2000): Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Jg. 57, S 30 – 39
- LfU Bayern (2013): *Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer – Klimawandel und Wasserhaushalt in Bayern*. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bearbeitung: Ref. 81 / F. Bäse, H. Morscheid, J. Weber, 8 S.
- Loomis, J., Kent, P., Strange, L., Fausch, K., Covich, A. (2000): Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Ecological Economics*, Jg. 33, S. 103–117
- Mastrotheodoros, T., Pappas, C., Molnar, P. et al. (2020): More green and less blue water in the Alps during warmer summers. *Nat. Clim. Chang.* Nr. 10, S. 155–161
- Moore, R., Spittlehouse, D., Story, A. (2005): Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Jg. 41, S. 813 – 834
- Moosmann, L., Schmid, M., Wüest, A. (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. *EAWAG Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz*, 27 S.

- NABU (2020): Wie werden Wälder fit für den Klimawandel? Projekt „Gläserner Forstbetrieb“. Download am 01.12.2020 unter <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/waelder/aktivitaeten/25598.html>
- Naimann, R. J., Sedell, J. R. (1980): Relationships between metabolic parameters and stream order in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Jg. 37, Nr. 5, S. 834-847
- Notter, B. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050. – Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. *gwa* 1/2009, S. 39 - 45
- Osborne, L. L., Kovacic, D. A. (1993): Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. *Freshwater biology*, Jg. 29, S. 243 – 258
- PRONAT: Sense. Grundlagen zur Fischereibewirtschaftung (Kurzfassung). Kanton Bern und Kanton Freiburg, Januar 2016.
- Pusey, B. J., Arthington, A. H. (2003): Importance of the riparian zone to the conservation and management of freshwater fish: a review. *Marine and Freshwater Research*, Nr. 54, S. 1-16.
- Ripl, W. (2012): Einfluss der Landschaftsnutzung auf das Klima und damit den Wasserhaushalt. Burgdorfer Wasserbautag 2012, Handout zum Vortrag, 17 S.
- Roth, T. R., Westhoff, M. C., Huwald, H., Huff, J. A., Rubin, J. F., Barrenetxea, G., Vetterli, M., Parriaux, A., Selker, J. S., Parlange, M. B. (2010): Stream Temperature Response to Three Riparian Vegetation Scenarios by Use of a Distributed Temperature Validated Model. *Environmental Science & Technology*, Jg. 44, Nr. 6, S. 2072 - 2078
- 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 Frühlingsemester 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>

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.