Wie halten wir unsere Fliessgewässer kühl? : Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Massnahmenvorschlägen

Autor(en): **Mende, Matthias / Sieber, Pascal**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **114 (2022)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-990509

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Wie halten wir unsere Fliessgewässer kühl?

Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Massnahmenvorschlägen

Matthias Mende, Pascal Sieber

Zusammenfassung

Die aktuellen Klimaszenarien zeigen, dass die sommerlichen Temperaturen bis 2060 gegenüber dem Referenzzeitraum 1981 bis 2010 um 2,5 bis 4,5 °C zunehmen werden *(NCCS, 2021)*. Die zusätzliche Verschärfung dieser Prognosen durch häufigere Trockenperioden und Hitzewellen waren der Anlass für vertiefte Untersuchungen der Temperatureinflüsse in unseren Fliessgewässern.

Die Untersuchungen umfassten die Messung und Auswertung der Wassertemperaturen in vier kleinen bis mittleren Fliessgewässern in einer Hitzeperiode im Sommer 2019. Erstmals konnte dabei der Temperaturverlauf über nahezu die gesamte Gewässerlänge quantifiziert und dargestellt werden.

Bei den kleineren Fliessgewässern (Erusbach AG, Jonen ZH, Wyna AG) ändert sich die Wassertemperatur kleinräumig in Abhängigkeit von lokalen Einflussfaktoren. Der Beschattungsgrad ist hierbei der wichtigste Faktor. Starke Beschattung (ca. 70 bis 100 Prozent Beschattung) durch Bewuchs oder auch Eindolungen bewirkt eine deutliche Abkühlung. Lokal konnten im Wald Abkühlungen bis zu $\Delta T = -3{,}8$ °C auf 300 m Gewässerlänge festgestellt werden.

Die Sihl, das grösste untersuchte Gewässer, zeigte im untersuchten Längsverlauf (36 km) zunächst eine generelle Temperaturzunahme, auf den unteren 17 km bis zur Mündung dagegen eine konstant hohe Temperatur von 25 bis 26 °C. Eine Unstetigkeit im Temperaturverlauf zeigte sich in der Restwasserstrecke des Ausleitungskraftwerks Waldhalde. Hier nahm die Temperatur mit $\Delta T = +4{,}7$ °C auf 4500 m Gewässerlänge weit stärker zu als unterhalb der Wasserrückgabe. Mit einer ähnlichen Verschärfung des Hitzestresses ist bei ausgebauten Gewässern ohne Niederwassergerinne zu rechnen, bei denen sich in Hitzeperioden ebenfalls wenig Abfluss auf grosser Breite verteilt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen decken sich weitgehend mit den Erfahrungen anderer Autoren. Sie zeigen, dass auch in der Schweiz bereits heute an kleinen und mittleren Gewässern eine Verringerung der Wassertemperatur im Bereich von 4 bis 5 °C möglich ist. Lebendige Fliessgewässer mit unter anderem intakten Forellen- und Äschenbeständen sind somit trotz Klimawandel möglich.

Resumé

Les scénarios climatiques actuels montrent que les températures estivales augmenteront de 2,5 à 4,5 °C d'ici 2060 par rapport à la période de référence 1981–2010 *(NCCS, 2021)*. L'aggravation supplémentaire de ces prévisions par l'augmentation des périodes de sécheresse et des vagues de chaleur a été l'occasion de mener des études approfondies sur l'influence de la température dans nos cours d'eau.

Ces études ont consisté à mesurer et à évaluer les températures de l'eau dans quatre cours d'eau de petite à moyenne taille pendant une période de canicule en été 2019. Pour la première fois, l'évolution des températures a pu être quantifiée et représentée sur presque toute la longueur du cours d'eau.

Dans les cours d'eau plus petits (Erusbach AG, Jonen ZH, Wyna AG), la température de l'eau varie à petite échelle en fonction de facteurs d'influence locaux. Le degré d'ombrage est ici le facteur le plus important. Un ombrage important (env. 70 à 100 % d'ombre) dû à la végétation ou à la mise sous tuyau provoque un net refroidissement. Localement, des refroidissements allant jusqu'à $\Delta T = -3{,}8$ °C sur 300 m de cours d'eau ont pu être constatés en forêt.

La Sihl, le plus grand cours d'eau étudié, a d'abord présenté une augmentation générale de la température sur son cours longitudinal (36 km), puis une température élevée et constante de 25 à 26 °C sur les 17 km inférieurs jusqu'à son embouchure. Une discontinuité dans l'évolution de la température est apparue dans le tronçon à débit résiduel de la centrale de dérivation de Waldhalde. Ici, la température a augmenté avec $\Delta T = +4{,}7$ °C sur 4500 m de cours d'eau, bien plus qu'en aval de la restitution d'eau. Il faut s'attendre à une aggravation similaire du stress thermique dans les cours d'eau aménagés sans lit d'étiage, pour lesquels, en période de canicule, un petit débit se répartit également sur une grande largeur.

Les résultats de ces études coïncident en grande partie avec les expériences d'autres auteurs. Ils montrent qu'en Suisse aussi, une réduction de la température de l'eau de l'ordre de 4 à 5 °C est déjà possible sur les petits et moyens cours d'eau. Des cours d'eau vivants avec, entre autres, des populations de truites et d'ombres intactes sont donc possibles malgré le changement climatique.

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 oder indirekt auf alle im Wasser lebenden Organismen aus.

In heissen Sommern und insbesondere an Hitzetagen sind die Wirbellosen und die Fische wie z. B. die Bachforelle und die Äsche besonders von Änderungen der Wassertemperatur betroffen. Als kritisch gelten für Bachforellen Temperaturen von über 19,0 °C *(Elliot et al., 1995)* bzw. 19,5 °C *(Spees, 2015)*. Ab diesen Temperaturen stellen die Fische die Nahrungsaufnahme

ein, leiden Stress und werden anfälliger für Krankheiten. Temperaturen von 25 °C sind sowohl für die Äsche als auch die Bachforelle bereits bei kurzzeitiger Überschreitung tödlich *(Elber et al., 2019)*.

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

- Fehlende oder unzureichende Beschattung der Gewässer.
- Überbreite Niedrig- und Mittelwasserprofile *(Bild 1)*.
- Grossflächige Entwässerung der Böden (z. B. durch Versiegelung, Bodenverdichtung, Drainagen) führt zur Absenkung des Grundwasserspiegels und ausgeprägten Niedrigwasserabflüssen.
- Grossflächige, oft standortfremde Nadelbaumforste anstelle naturnaher Laubwälder. Generell erwärmen sich Nadelbaumforste deutlich stärker als Laubwälder *(z. B. NABU, 2020)*.

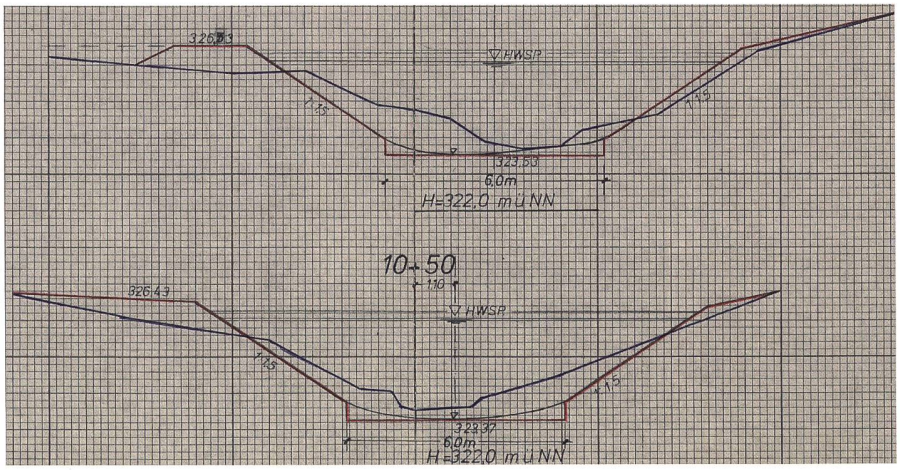

Bild 1: Querprofile vom Ausbau der Kupfer in Kupferzell (Baden-Württemberg). Blau: Ausgangszustand mit ausgeprägtem Niederwassergerinne; Rot: Ausbauzustand mit überbreitem Niedrig- und Mittelwasserprofil.

	Einzugsgebiets-fläche [km²]	Sohlenbreite [m]	Untersuchte Länge [km]	Abfluss [m³/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.

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.

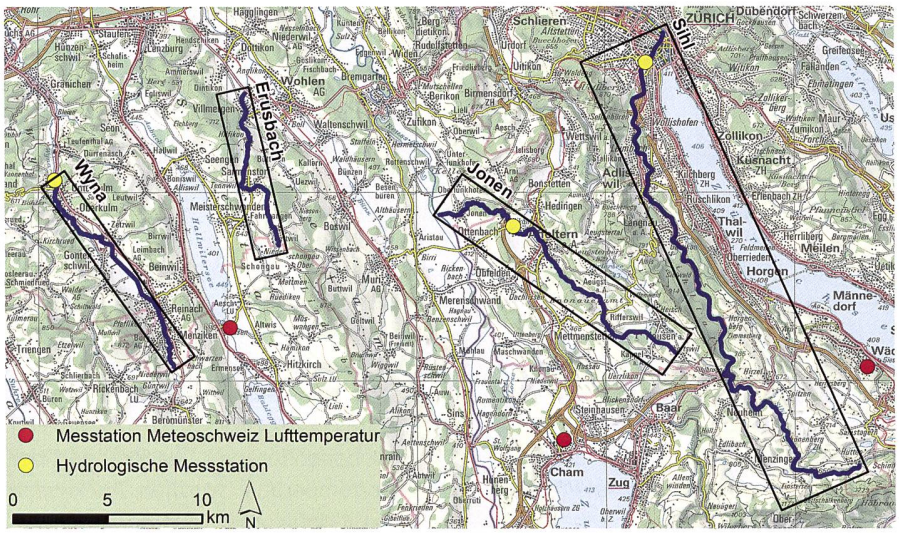

Bild 2: Übersicht der untersuchten Fliessgewässerstrecken mit Standorten der Abflussmessstationen und von Temperatur-Messstationen von MeteoSchweiz. (Quelle: swisstopo).

Der Klimawandel verstärkt diese Prozesse, da er neben der Temperaturerhöhung auch zu ausgeprägteren Niedrigwassersituationen führt.

Das Ziel des hier beschriebenen Projekts «Temperaturverlauf in Fliessgewässern» *(Mende & Sieber, 2020)* war es, die Temperatur im Gesamtverlauf von Fliessgewässern zu messen und bildhaft darzustellen, um so folgende Fragen beantworten zu können:

- Wie verändert sich die Wassertemperatur im Längsverlauf eines Fliessgewässers zu verschiedenen Tageszeiten eines Hitzetags (T ≥ 30 °C)?
- Welchen Einfluss haben verschiedene Faktoren (z. B. Beschattung durch Vegetation, seitliche Zuflüsse, Einleitung von geklärtem Wasser (ARA), Eindolungen, Gewässerstruktur etc.) auf die Wassertemperatur?

Auf diese Weise soll das Bewusstsein für Temperaturprozesse in Fliessgewässern und für die Wirkung von Massnahmen zur Abkühlung geschärft werden. Der Fokus liegt hierbei auf den Bächen und kleinen Flüssen, die natürlicherweise meistens durch einen Kronenschluss der Ufergehölze gekennzeichnet wären. Sie stellen etwa 80 Prozent unserer Fliessgewässerlängen *(Tent, 2011)*. Für ihre Bewohner sind hohe Wassertemperaturen besonders gravierend.

2. Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Es wurden vier Fliessgewässer in den Kantonen Aargau (AG) und Zürich (ZH) in ihrem Längsverlauf analysiert: Sihl (ZH), Jonen (ZH), Wyna (AG), Erusbach (AG)*(Tabelle 1)*.

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. *Bild 2* zeigt eine Übersicht über die untersuchten Gewässerabschnitte.

2.2 Eingesetzte Messinstrumente

Für die Messungen wurden 110 Temperaturlogger der Marke HOBO® Water Temp

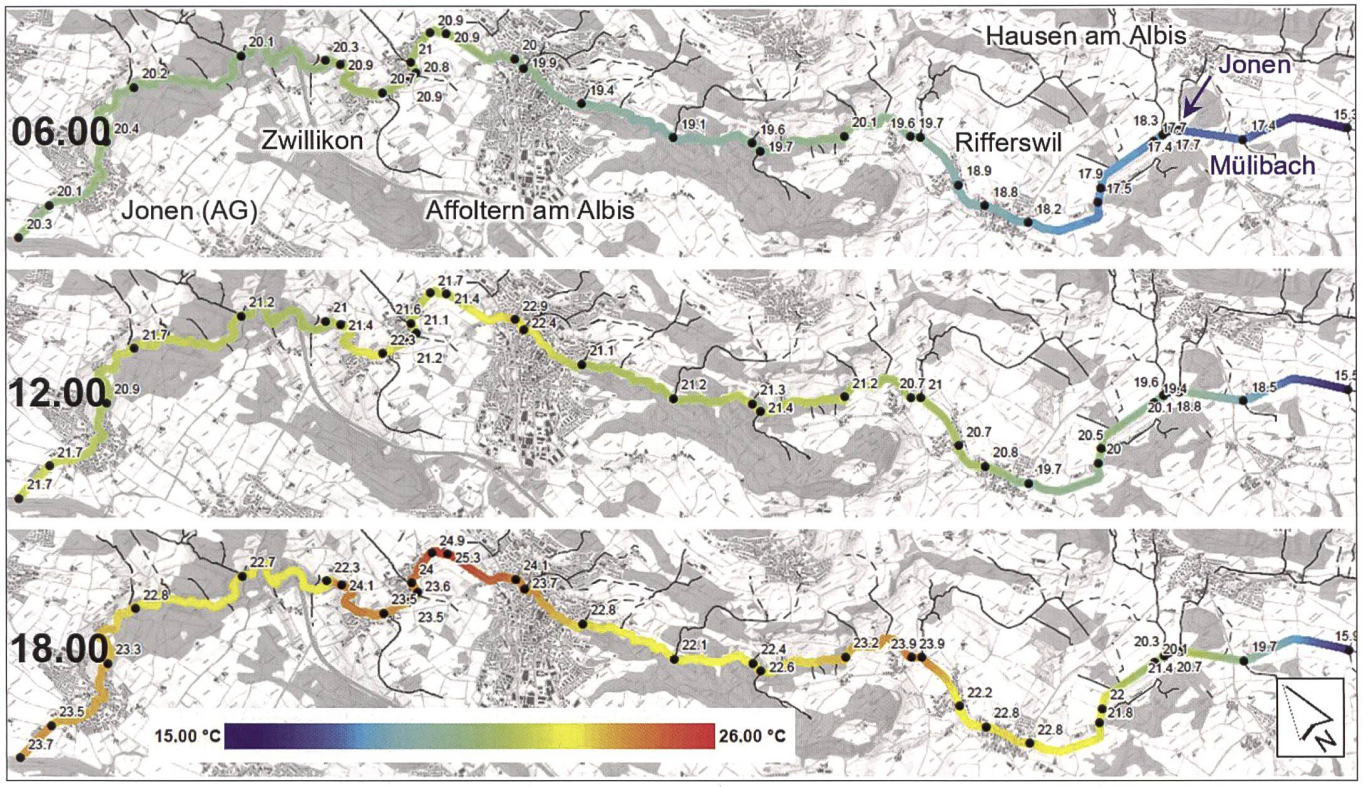

Bild 4: Temperaturverlauf in der Jonen am 26. Juli 2019 am Beispiel der Zeitpunkte 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr. Der Zufluss der Jonen ist mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet (Fliessverlauf von rechts nach links).

Pro v2 der Firma Onset eingesetzt. Alle 110 Logger wurden auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft und fehlerhafte Datenlogger ausgemustert.

2.3 Vorgehen, Ablauf der Messungen

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

2.4 Messungen an den Fliessgewässern

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

- Sihl: 9. August, 0.00 Uhr bis 13. August 2019, 23.55 Uhr
- Jonen: 23. Juli, 0.00 Uhr bis 31. Juli 2019, 23.55 Uhr
- Wyna: 26. Juli, 0.00 Uhr bis 10. August 2019, 23.55 Uhr
- Erusbach: 20. Juli, 0.00 Uhr bis 31. Juli 2019, 23.55 Uhr

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

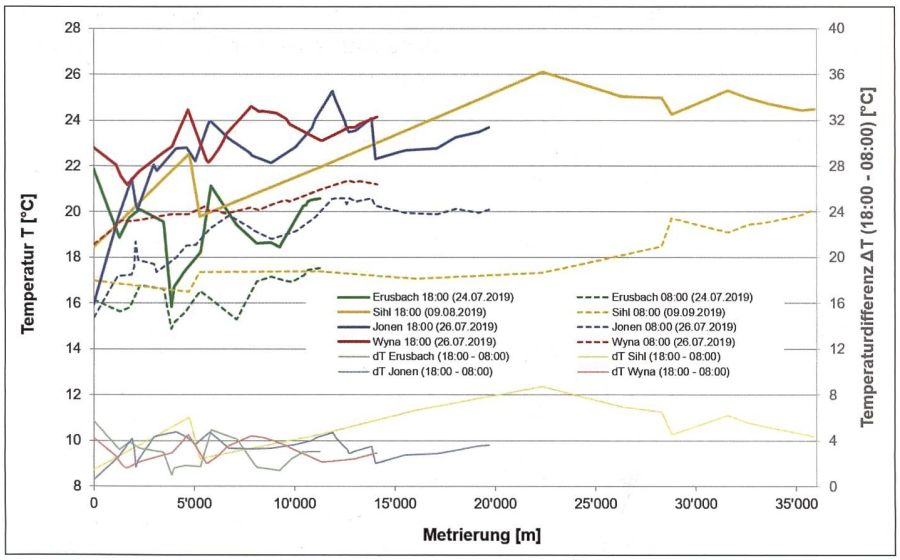

Bild 3: Temperatur-Längenprofile für Erusbach, Sihl, Jonen und Wyna jeweils um 8:00 Uhr (gestrichelte Linien) und um 18.00 Uhr (durchgezogene Linien; primäre Y-Achse). Als 0-Punkt ist der oberste Datenlogger definiert. Auf der sekundären Y-Achse (rechts) sind die Temperaturdifferenzen zwischen 8.00 und 18.00 Uhr dargestellt. Die Messungen an den vier Gewässern erfolgten nicht am gleichen Tag.

3. Ergebnisse

3.1 Thermische Charakteristika der untersuchten Gewässer

Bei den untersuchten Fliessgewässern zeigte sich mit Ausnahme des Erusbachs 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.

Am späten Nachmittag *(Bild 3, 18.00)* wird die kritische Temperatur von Bachforelle und Äsche von 19,0 bzw. 19,5 °C (s. o.) mit Ausnahme des Erusbach an den untersuchten Gewässern quasi durchgängig überschritten. Die Letaltemperatur der genannten Arten wird in der Wyna und dem Erusbach durchgehend unterschritten, in der Jonen jedoch kleinräumig und in der Sihl sogar über fast die Hälfte der untersuchten Strecke überschritten.

Die gemessenen Temperaturverläufe wurden zur Verdeutlichung der Prozesse auch in Situationsplänen dargestellt. *Bild 4* zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf in der Jonen zu verschiedenen Uhrzeiten am 26. Juli 2019. Die Lage der Datalogger ist jeweils durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet, danebenstehend findet sich die gemessene Wassertemperatur zur genannten Zeit. Zwischen den Messpunkten wurden die Temperaturen linear interpoliert und jeder Temperatur eine Farbe zugeordnet. Somit ist die Temperaturentwicklung in Fliessrichtung und auch im Tagesverlauf schnell ersichtlich.

Das Beispiel der Jonen zeigt einen heterogenen Temperaturverlauf im Längsverlauf. Die obersten drei Messpunkte wurden im Mülibach gesetzt, weil dieser Abschnitt kanalartig und unbeschattet verläuft und deshalb für die Fragestellung interessant war. Es finden auf der gesamten untersuchten Strecke immer wieder Abkühlungs- und Erwärmungstendenzen statt. Die höchsten Temperaturen wurden etwas unterhalb von Affoltern am Albis gemessen. In diesem Bereich wurde die Letaltemperatur von Äsche und Forelle überschritten, er ist entsprechend in rot und orange dargestellt. Lokale Erwärmungs- und Abkühlungserscheinungen sind sehr ausgeprägt.

3.2 Tagesverlauf der Wassertemperatur

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

- **Minimalwerte** treten in den frühen Morgenstunden kurz nach Sonnenaufgang auf **(ca. 6.00 bis 8.00 Uhr)**
- **Maximalwerte** treten am späten Nachmittag bis frühen Abend auf **(ca. 16.00 bis 20.00 Uhr)**. Eine Ausnahme bildet die Sihl, das grösste untersuchte Gewässer. Hier treten die höchsten Temperaturen aufgrund von Temperaturdrift *(Kap. 3.3)* im unteren Projektperimeter teilweise später auf (ca. 22.00 Uhr).
- Zwischen den Minimal- und Maximalwerten erfolgt ein meist sinuskurvenförmiger Anstieg bzw. Abfall.

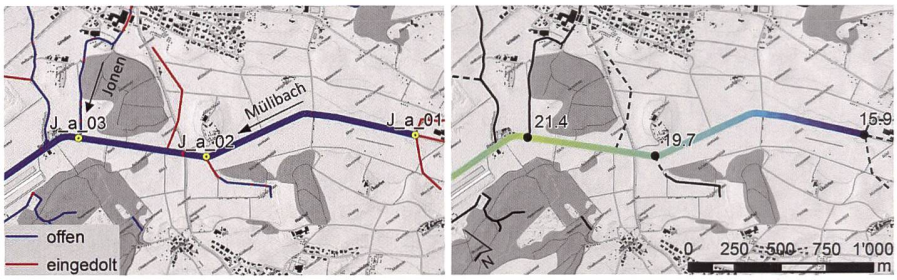

Bild 5: Mülibach (seitlicher Jonenzufluss) am 26. Juli 2019 um 18.00 Uhr (rechts: Temperatur in °C).

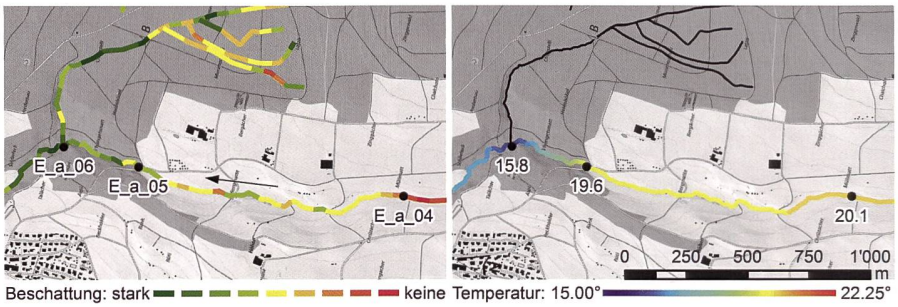

Bild 6: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau (links) und der Wassertemperatur im Erusbach (rechts) zwischen Bettwil und Sarmenstorf am 24. Juli 2019 um 18.00 Uhr (Temperatur in °C). Der Messpunkt E_a_06 liegt oberhalb des seitlichen Zuflusses.

- Die täglichen Temperaturamplituden liegen zwischen 1 bis 5 °C. Für die Sihl wurden Spitzenwerte von über 8 °C gemessen *(Bild 3)*.

3.3 Temperaturdrift

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

3.4 Wirkung der Einflussfaktoren

3.4.1 Beschattung durch Ufergehölze und Hochstauden

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

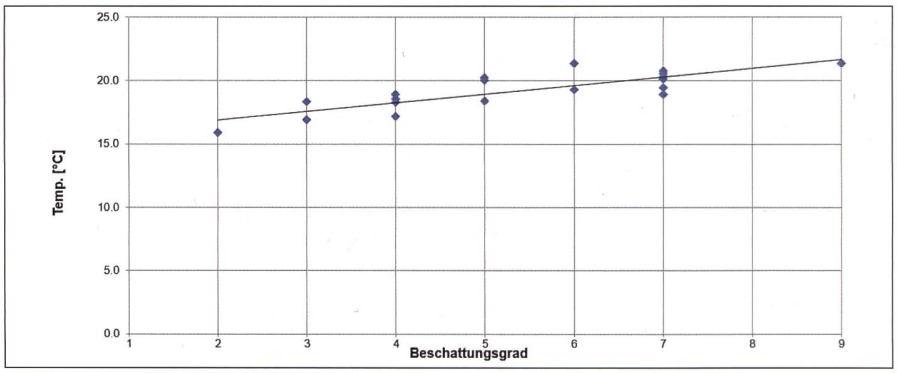

Bild 7: Lineare Regression für die gemessene Wassertemperatur des Erusbachs um 16 Uhr (24. Juli 2019) in Abhängigkeit des Beschattungsgrads beim Messpunkt gemäss Beschattungskarte des Kt. AG (1 = starke Beschattung; 9 = keine Beschattung). Das Bestimmtheitsmass liegt bei 68 Prozent und zeigt eine relativ hohe Anpassung der Regression an die Datenpunkte (Signifikanzniveau < 0,05).

*Den Autoren ist bewusst, dass Temperaturdifferenzen i. d. R. in «Kelvin» angegeben werden. Da die Studie einen möglichst breiten Leserkreis ansprechen soll, wurde hier die eher populärwissenschaftliche Bezeichnung «Grad Celsius» gewählt.

Fehlende oder geringe Beschattung (0 bis 40 Prozent)

Das Wasser des Mülibachs (Zufluss zur Jonen) tritt am Beginn des Projektgebiets beim Messpunkt J_a_01 um 18.00 Uhr mit 15,9 °C vergleichsweise kühl aus einer 600 m langen Eindolung aus. Auf der nur ca. 1,8 km langen, im Landwirtschaftsgebiet gelegenen und weitgehend unbeschatteten Strecke bis zum übernächsten Messpunkt findet eine starke Erwärmung auf 21,4 °C statt ($\Delta T^* = +5{,}5$ °C um 18.00 Uhr; *Bild 5*).

Mittlere bis starke Beschattung (60 bis 100 Prozent)

Eine mittlere bis starke Beschattung (gelb bis dunkelgrün gemäss Beschattungskarte des Kantons Aargau, entspricht 60 bis 100 Prozent Beschattung) kann zu einer markanten Abkühlung des Gewässers führen (Erusbach, *Bild 6*). Auf einer Länge von 1220 m kühlt er sich auf einem mittel beschatteten Abschnitt zunächst leicht von 20,1 auf 19,6 °C ab ($\Delta T = -0{,}7$ °C). Der anschliessende Abschnitt von 320 m Länge im Wald mit starker Beschattung führt sogar zu einer weiteren Abkühlung um $\Delta T = -3{,}8$ °C auf 15,8 °C, wobei der zusätzliche Einfluss eines Grundwasserzustroms an dieser Stelle nicht völlig auszuschliessen ist.

Für den Erusbach wurde die Korrelation zwischen dem Beschattungsgrad (gemäss Beschattungskarte des Kt. AG) und der Wassertemperatur am 24. Juli 2019 berechnet. Hierbei ist anzumerken, dass nur der Beschattungsgrad am Messpunkt selbst in der Analyse berücksichtigt werden konnte, d. h. Einflüsse der unmittelbar oberhalb liegenden Strecke wurden nicht erfasst. Für den Erusbach konnte ein positiver Zusammenhang zwischen dem Beschattungsgrad und der Wassertemperatur um 16.00 Uhr, als annähernd die höchsten Temperaturen auftraten, nachgewiesen werden (Korrelationskoeffizient = 0,68, Signifikanzniveau < 0,05; vgl. *Bild 7*). Dies untermauert die These, dass bei kleineren Gewässern vor allem die lokalen Verhältnisse im Umfeld des Messpunkts einen Einfluss auf die Wassertemperatur haben und der Wärmetransport (Temperaturdrift; *Kap. 3.3*) von untergeordneter Bedeutung ist.

Bild 8: Erusbach am 24. Juli 2019 um 16.00 Uhr. Linke Abbildung: rot = eingedolt. (rechts: Temperatur in °C).

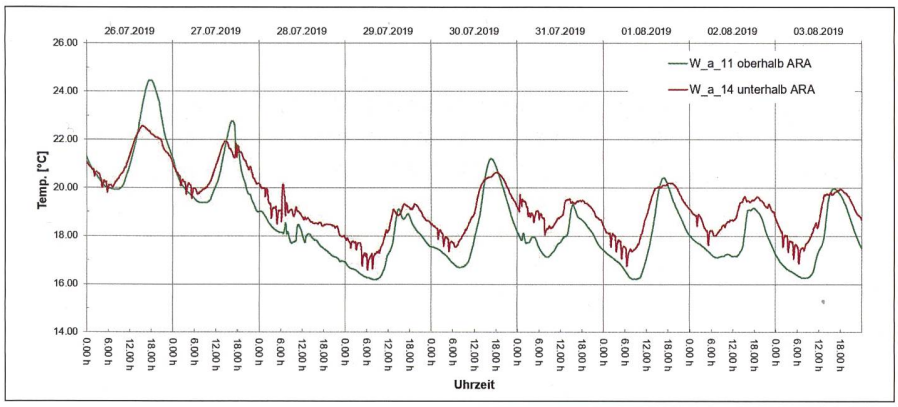

Bild 9: Zeitlicher Temperaturverlauf in der Wyna oberhalb und unterhalb der Kläranlage Reinach.

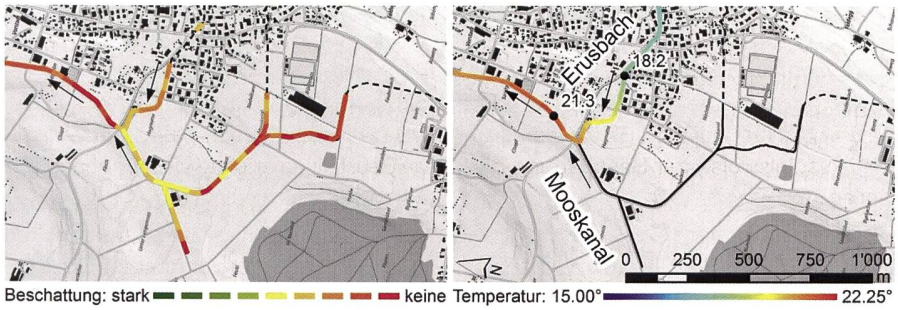

Bild 10: Gegenüberstellung der Beschattungskarte des Kantons Aargau und der Wassertemperatur im Erusbach bei Sarmenstorf am 24. Juli 2019 um 16.00. Der Mooskanal mündet von unten (Pfeil) in den Erusbach. (rechts: Temperatur in °C).

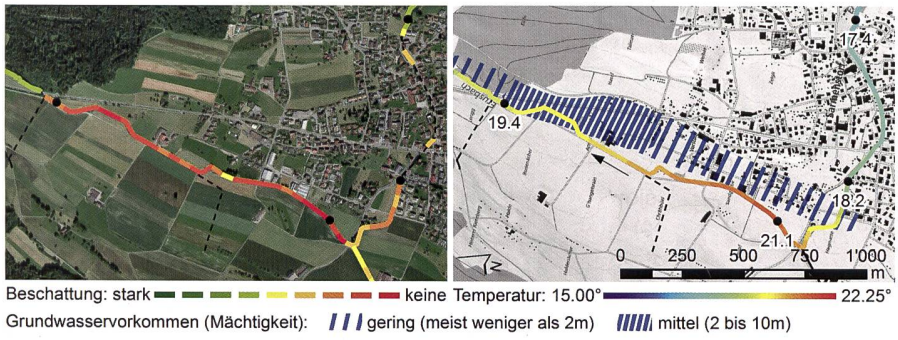

Bild 11: Erusbach am 24. Juli 2019 (18.00) unterhalb der Gemeinde Sarmenstorf. (rechts: Temperatur in °C).

3.4.2 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 von der Temperatur des angrenzenden Erdreichs dominiert.

Quantifiziert werden konnte die Wirkung einer Eindolung im oberen, landwirtschaftlich geprägten Projektperimeter des Erusbachs *(Bild 8)*. In der rund 500 m langen Eindolung kühlte sich das Wasser um bis zu $\Delta T = -3{,}3$ °C ab.

3.4.3 Einleitungen aus Abwasserreinigungsanlagen

Einleitungen aus Abwasserreinigungsanlagen (ARA) sind prozessbedingt vergleichsweise warm und können daher zu einer Erwärmung der als Vorfluter dienenden Fliessgewässer beitragen. Wie die Messungen in der Wyna zeigen, lag die Wassertemperatur unterhalb des ARA-Zuflusses im Mittel um knapp 1 °C über den Wer-

ten oberhalb *(Bild 9)*. Bei den Maximaltemperaturen kehrt sich das Bild jedoch um, hier konnten Abnahmen der Wassertemperatur um bis zu ΔT = -2,0 °C (Wyna am 26. Juli 2019) nachgewiesen werden.

3.4.4 Seitenbäche

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

Folgendes Beispiel des Erusbachs *(Bild 10)* 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. ΔT = +3,0 °C. Bei den anderen untersuchten Gewässern war der Einfluss der Seitengewässer weniger ausgeprägt. Er lag im Bereich von ca. ΔT = ±1,0 °C.

3.4.5 Grundwasser

Der Einfluss von Grundwasser auf die Wassertemperatur konnte nicht quantitativ untersucht werden, da sich insbesondere die Tiefe der Grundwasserkörper aus Kartenwerken nicht unmittelbar ableiten 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 sind exfiltrierende Grundwasserverhältnisse eine plausible Erklärung, wie die Grundwasserkarte zeigt. Trotz weitgehend fehlender Beschattung auf einer Länge von 1400 m nimmt hier die maximale Wassertemperatur (Messung um 18.00 Uhr) um ΔT = -1,7 °C ab.

3.4.6 Restwasserstrecken und Wasserrückgaben von Ausleitungskraftwerken

Hinsichtlich der Wassertemperatur ist der Einfluss des Wasserkraftwerks Waldhalde bei Hütten besonders auffällig. Auf der 4,5 km langen Restwasserstrecke (bis km 4,8, *Bild 3*) erwärmt sich die Sihl trotz oft schluchtartigem Verlauf, beidseitiger Bewaldung und einer Lage oberhalb 600 m.ü.M. von 18,9 auf bis zu 23,6 °C (ΔT = +4,7 °C; *Bild 12*). Mit der Wasserrückgabe erfolgt eine plötzliche Abkühlung auf 19,8 °C (ΔT = -3,8 °C). Der geringe Abfluss in der Restwasserstrecke und die damit verbundene kleine Wassertiefe auf grosser Abflussbreite haben bei starker Sonneneinstrahlung einen deutlichen (erwärmenden) Einfluss auf die Wassertemperatur.

3.4.7 Gewässerumfeld: Siedlungsgebiet / Offenland / Wald

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

- Die stärkste Temperaturabnahme aller untersuchten Gewässer trat in einem Waldgebiet auf (Erusbach: ΔT = -3,8 °C auf 320 m Abschnittslänge, *Bild 6*). Die Abkühlung war hier weit grösser als in stark beschatteten Abschnitten des Offenlands oder in Siedlungsgebieten.
- Bei den maximalen Temperaturen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Offenland und Siedlungsgebiet festgestellt werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die untersuchten Gewässer in Siedlungsgebieten im Unterschied zum Offenland oft eingedolt und somit stark beschattet waren *(vgl. auch Kap. 3.4.2)*. Dies lässt vermuten, dass sich Gewässer bei gleichem Beschattungsgrad in Siedlungsgebieten stärker erwärmen als im Offenland.

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

3.4.8 Gewässerstruktur

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

Über die starke Erwärmung der Sihl innerhalb der Restwasserstrecke *(Kap. 3.4.6)* können aber Rückschlüsse auf die Wirkung der Struktur gezogen werden. Durch die Ausleitung eines Grossteils des Abflusses sinken in der Restwasserstrecke die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit. Beide Faktoren begünstigen, verstärkt durch die breite Sohle, die Erwärmung. Die Situation ist somit vergleichbar mit derjenigen begradigter Fliessgewässer, die in der Regel durch überbreite Niedrig- und Mittelwasserprofile gekennzeichnet sind. In Hitzeperioden, die meist mit Niedrigwasserabflüssen einhergehen, verteilt sich das wenige Wasser eben-

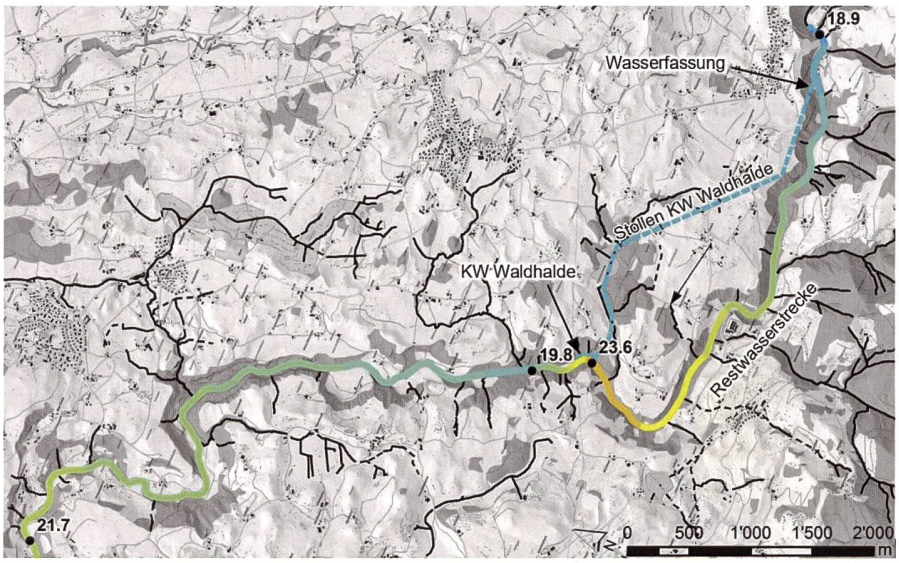

Bild 12: Sihl am 9. August 2019 (16.00 Uhr) auf dem oberen Projektabschnitt zwischen Hütten und Hirzel. (Temperatur in °C).

falls über eine für diesen Abfluss unnatürlich grosse Sohlenbreite und erwärmt sich stark. Ob dieser Effekt ähnlich ausgeprägt ist wie in der Restwasserstrecke der Sihl ($\Delta T = +4{,}7\,°C$ auf 4500 m Länge; *Kap. 3.4.6*), kann nicht abschliessend beantwortet werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit kann aber von einem bedeutenden Einfluss der Gewässerstruktur auf die Wassertemperatur ausgegangen werden. Stark strukturierte Gewässer mit einer eher schmalen Sohle, resp. einem ausgeprägten Niederwassergerinne erwärmen sich weniger stark. Der Einfluss der Gewässerstruktur gewinnt damit an Bedeutung, je weniger das Gewässer beschattet ist.

4. Empfehlungen

Beschattung

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

Die gemessenen Tageshöchstwerte lagen auf weiten Strecken deutlich über 20 °C und überschritten teilweise sogar die Letaltemperatur von Äsche und Bachforelle von 25 °C. Eine relativ schnelle Verbesserung dieser heiklen Situation, die sich mit dem Klimawandel weiter verschärfen wird, ist nur mit einer deutlich stärkeren Beschattung zu erreichen. Vor diesem Hintergrund scheint der von *Broadmeadow et al. (2010)* und *Elber et al. (2019)* empfohlene Beschattungsgrad von mindestens 80 Prozent der Wasserfläche insbesondere in Gewässern mit sich selbst fortpflanzenden Beständen temperaturempfindlicher Arten prinzipiell angemessen. Es ist jedoch auch mit bemerkenswerten und geschützten Arten zu rechnen, die durch eine Bestockung beeinträchtigt werden (z. B. spezialisierte Arten von Libellen, Pflanzen oder Vögeln, vgl. *Hedinger & Sarbach-Remund (2021)*). Deshalb sollte die Planung unter Einbindung regionaler Artexperten erfolgen und gegebenenfalls eine geringere Beschattung angestrebt werden.

Ist eine ausreichende 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 folgenschwer sein, daher sollte auch das Westufer bestockt werden. Ist der «Spielraum» für Ufergehölze durch den Hochwasserschutz stark eingeschränkt, sollte zumindest eine hoch aufgeastete Baumreihe entlang der Uferlinie geprüft werden, die den Hochwasserstand nur geringfügig verändert.

Eine Möglichkeit zur Kühlung sehr kleiner Fliessgewässer ist die Etablierung von Hochstaudenfluren, die aufgrund ihres hohen Wuchses eine gute Schattenwirkung haben. Sie sollten darum (zumindest an den Südböschungen) erst ab September gemäht werden. An grossen Fliessgewässern wie der Sihl kann durch Ufergehölze «nur» eine Teilbeschattung erreicht werden. Es wird empfohlen, Bäume, die möglichst grosse, weit ausladende Kronen ausbilden können, direkt an die Uferlinie zu pflanzen.

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

Gerinneform und -strukturierung

Die Wassererwärmung wird wesentlich durch die Fliessgeschwindigkeit und die Wassertiefe im Verhältnis zur Gerinnebreite beeinflusst. In Hitzeperioden herrscht meist Niedrigwasserabfluss. 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 *(Bild 13)*. Hierbei ist folgendes zu beachten:

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

Eine naturgemässe Gerinnegestaltung und -strukturierung bedeutet, das Niederwassergerinne über weite Strecken eng zu halten, was einer Erwärmung entgegenwirkt, die Vernetzung mit dem Grundwasserkörper verbessert und zu mehr Refugien für die aquatische Fauna führt *(Bild 14)*.

Stauhaltungen, Ausleitungen und Restwasserstrecken (Wasserkraftnutzung)

Jegliche Querbauwerke und Stauhaltungen vergrössern die Wasserspiegelbreite und erhöhen die Aufenthaltszeit des Wassers insbesondere in Niedrigwasserphasen. Sie führen daher zu einer verstärkten Erwärmung und sollten wo immer möglich zurückgebaut werden. Mit dem Rückbau sind zahlreiche weitere positive Effekte (u. a. Wiederherstellung der freien Fischwanderung, des natürlichen Geschiebetriebs 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 Restwasserdotation in Kombination mit dem Niederwassergerinne ausreicht, um zumindest die

Bild 13: Entwicklung eines Niederwassergerinnes mit Instream-Massnahmen. (Fotos: Kt. LU, vif, Abt. Naturgefahren).

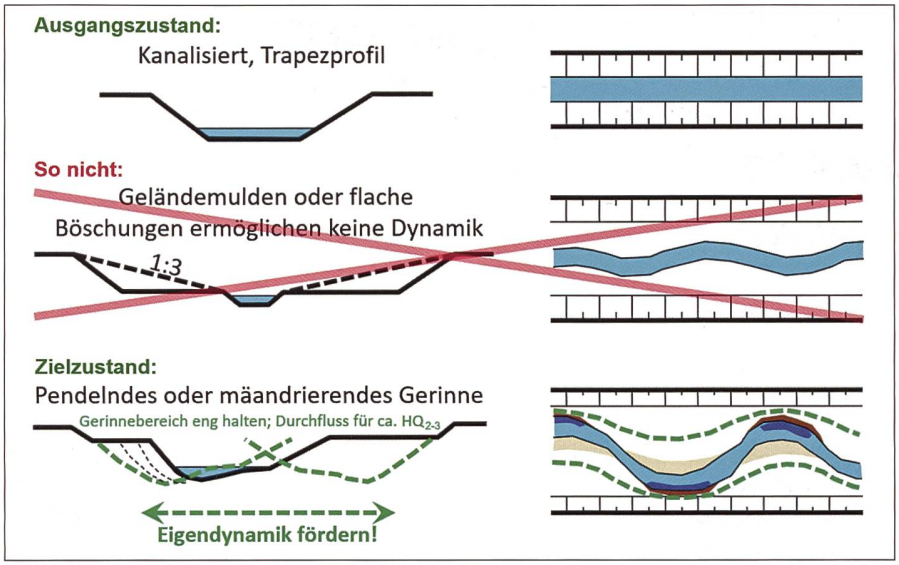

Bild 14: Strukturierung eines zu revitalisierenden Fliessgewässers mit natürlicherweise mäandrierender Gerinneform. Flache Böschungen (z. B. 1:3) kommen in der Natur kaum vor und sollten vermieden werden. In Geländemulden mit kleinem Niederwassergerinne können sich bei Hochwasser keine dynamischen Strömungen entwickeln, die zu einer Strukturierung führen würden. Besser ist das Anlegen eines mäandrierenden oder pendelnden, gut strukturierten und eigendynamischen Gerinnes. Das Wasser fliesst konzentriert im eher eng gehaltenen Niederwassergerinne (oder besser «Mittelwassergerinne») mit Prall- und Gleithangstrukturen.

Letaltemperatur von Äsche und Bachforelle von 25 °C zuverlässig dauerhaft zu unterschreiten.

Massnahmen in der Fläche

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

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

Fazit

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

Dank

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

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

Quellen:

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, S. 226-237

NCCS (2021): Schweizer Gewässer im Klimawandel. National Centre for Climate Services, Zürich, ISBN: 978-3-9525031-4-0

NCCS (Hrsg.) 2021: Schweizer Gewässer im Klimawandel. National Centre for Climate Services, Zürich. 28 S., ISBN 978-3-9525413-3-3

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

Hedinger, C, Sarbach-Remund, N. (2021): Überblick über die Bedeutung der Bestockung von Fliessgewässern auf National Prioritäre Arten. Expertenbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern, 88 S.

Mende, M., Sieber, P. (2020): Temperaturverlauf in Fliessgewässern - Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Massnahmenvorschlägen. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, der Kantone Bern, Aargau und Zürich und des WWF Schweiz, 49 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

Spees, J. (2015): Keeping Rivers Cool – Ribble Rivers Trust. Vortrag beim Burgdorfer Wasserbautag, 16. November 2015

Spycher, L. (2020): Wasserbauliche Massnahmen hinsichtlich Bestandssteigerung Forellen und Äschen - Einfluss von Baustoffen auf die Wassertemperatur, Auswertung Temperatur-Monitoring am Gäbelbach. Bachelorthesis Frühlingssemester 2020, 68 S.

Tent, L. (2011): Viel Lebensraum für wenig Geld: Instream Restaurieren. – in: Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Burgdorf / Bau und Wissen, Wildegg (Hrsg.): Burgdorfer Wasserbautag 2011: Aktueller Flussbau – Minimaler Materialeinsatz durch gezielte Nutzung der Strömungskräfte – Instream River Training. Kap. 4, 20 S.

WSL (2019): Wälder schützen Pflanzen und Tiere vor Klimaerwärmung. Download am 27. Oktober 2020 unter https://www.wsl.ch/de/newsseiten/2019/04/waelder-schuetzen-pflanzen-und-tiere-vor-klimaerwaermung.html

Autoren:

Matthias Mende, IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, 3000 Bern 14, matthias.mende@iub-ag.ch

Pascal Sieber, Sieber & Liechti GmbH, Limmatauweg 9, 5408 Ennetbaden, pascal.sieber@sieberliechti.ch