

Klimawandel und steigende Wassertemperaturen in Schweizer Fließgewässern: Ein zunehmender Stressfaktor für Kaltwasserfische

Love C. Råman Vinnå, Vidushi Bigler, Oliver S. Schilling, Jannis Epting

Zusammenfassung

Als Folge des Klimawandels steigen die Temperaturen in Schweizer Fließgewässern. Um die zukünftige Entwicklung der Fließgewässertemperaturen sowie den damit verbundenen Stress für Kaltwasserfische abschätzen zu können, fand im Rahmen des BAFU-Forschungsprojekts «Zukünftige Flusstemperaturen in der Schweiz unter dem Einfluss des Klimawandels (Future River Temperatures FuRiTe)» eine schweizweite Projektion zukünftiger Temperaturen von Fließgewässern für die 82 vom BAFU betriebenen Flussmessstationen statt.

Die nun veröffentlichten Projektionen zeigen, dass eine generelle Abnahme des Sommerabflusses (-10 bis -40 Prozent) und eine Zunahme des Winterabflusses (+10 bis +30 Prozent), kombiniert mit dem weiteren Anstieg der mittleren oberflächennahen Lufttemperatur (0,5°C pro Jahrzehnt), zu insgesamt wärmeren Fließgewässern führen wird (BAFU, 2021). So werden ohne Klimaschutzmassnahmen die durchschnittlichen Fließgewässertemperaturen um 3,0°C (0,37°C pro Dekade von 1990 bis 2099) ansteigen, während mit Klimaschutzmassnahmen die Temperaturen nur um 0,9°C ansteigen. Die stärkste Erwärmung der Fließgewässer ist im Alpenraum zu erwarten, gefolgt von Fließgewässern unterstromig von Seen. Grundwasserbeeinflusste Fließgewässer zeichnen sich durch ein gedämpftes Temperatursignal aus, das weitgehend von der Lufttemperatur entkoppelt ist.

Zudem wird es im Sommer mehr und längere Niedrigwasserperioden mit extremen Wassertemperaturen geben. Dies erhöht das thermische Stresspotenzial für temperaturempfindliche aquatische Arten wie die kaltwasserliebende Bachforelle drastisch, sowohl in Fließgewässern, in denen solche Situationen bereits auftreten, als auch in jenen, die bis anhin noch nicht betroffen waren.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass durch die Bereitstellung von Prognosen zu Schwellenwertüberschreitungen bei zukünftigen Wassertemperaturen gezielt betroffene Fließgewässer identifiziert werden können. Diese Ergebnisse liefern wertvolle Grundlagen für die Entwicklung standortspezifischer Klimaschutzstrategien und Managementmassnahmen zur Minderung der negativen Auswirkungen des Klimawandels. Dazu gehören unter anderem Staudamm- und Regenwassermanagement, kontrollierte Grundwasseranreicherung, Flussrenaturierung sowie die Wiederherstellung von Fluss-Grundwasser-Interaktionsprozessen.

Résumé

En raison des changements climatiques, les températures des cours d'eau suisses augmentent. Afin de pouvoir estimer leur évolution future ainsi que le stress associé à cette augmentation pour les poissons d'eaux froides, une projection des températures futures des cours d'eau a été réalisée. Cette dernière s'applique à l'échelle de la Suisse pour les 82 stations de mesures fluviales gérées par l'OFEV dans le cadre du projet de recherche « Future River Temperatures FuRiTe », qui s'intéresse à l'évolution de la température des cours d'eau en Suisse dans le contexte des changements climatiques.

Les projections publiées indiquent une diminution générale du débit estival (-10 à -40%) et une augmentation du débit hivernal (+10 à +30%), ainsi qu'une augmentation de la température moyenne de l'air (0,5°C par décennie), entraîneront un réchauffement global des cours d'eau (OFEV, 2021). Sans mesures de protection du climat, les températures moyennes des cours d'eau augmenteront donc de 3,0°C (0,37°C par décennie de 1990 à 2099). Au contraire, des mesures de protection du climat permettraient de freiner cette augmentation à seulement 0,9°C. Le réchauffement le plus important est attendu dans pour les cours d'eau alpins, suivi par ceux situés en aval des lacs. Les cours d'eau influencés par les eaux souterraines se caractérisent par une variation de température atténuée, largement découplée de la température de l'air.

De plus, les périodes d'étiage, également caractérisées par des températures extrêmes de l'eau, seront plus nombreuses et plus longues en été. Cela augmente considérablement le potentiel de stress thermique pour les espèces aquatiques sensibles à la température, comme la truite de rivière qui aime les eaux froides. Cela est valable aussi bien pour les cours d'eau où de telles situations se produisent déjà, ainsi que dans ceux qui ne sont pas encore concernés à ce jour.

Les résultats montrent qu'il est possible d'identifier de manière ciblée les cours d'eau concernés en fournissant des prévisions de dépassement de valeurs de seuil pour les futures températures de l'eau. Ces résultats permettent le développement de stratégies de protection du climat et de mesures de gestion spécifiques à chaque site afin d'atténuer les effets négatifs des changements climatiques. Il s'agit notamment de la gestion des barrages et des eaux pluviales, de la recharge contrôlée des nappes phréatiques, de la renaturation des rivières ainsi que de la restauration des processus d'interaction rivière-eau souterraine.

Ausgangslage

Der Klimawandel hat bereits zu einem nachweisbaren Anstieg der Fließgewässertemperaturen geführt – ein Trend, der sich mit grosser Wahrscheinlichkeit fortsetzen wird (Van Vliet et al., 2011; 2013). Ohne wirksame Klimaschutzmassnahmen könnten gemäss Prognosen bis zu 36 Prozent aller Süsswasserfischarten global in ihren zukünftigen Lebensräumen klimatischen Extremen ausgesetzt sein (Barbarossa et al., 2021). Dabei gelten Veränderungen der Wassertemperaturen als gravierender als jene der Wasser-
verfügbarkeit.

Das Ausmass der Erwärmung von Flüssen, insbesondere während Hitzewellen und Dürreperioden, wird nicht nur von den oberflächennahen Lufttemperaturen beeinflusst, sondern auch von Faktoren wie der Abflussmenge, den Wechselwirkungen zwischen Flüssen und dem Grundwasser sowie von anthropogenen Aktivitäten. Zu diesen zählen Begradigungen von Flussläufen, Stauungen, Wassernutzungen für Kühlzwecke und Einleitungen von Abwasser oder Regenwasser, welche die Wasserqualität erheblich beeinträchtigen können (Ficklin et al., 2023; Van Vliet et al., 2023).

Auch in der Schweiz, dem Wasserschloss Europas, haben sich die Auswirkungen des Klimawandels bereits sowohl auf die Flusstemperaturen (Hari & Güttinger, 2004), als auch auf die Abflüsse (Birsan et al., 2005) ausgewirkt. So betrug die Erhöhung der Wassertemperatur in der Schweiz zwischen 1979 und 2018 pro Jahrzehnt im Mittel 0,33°C, während die oberflächennahe Lufttemperatur pro Jahrzehnt um 0,46°C zunahm (Michel et al., 2022). Gemäss den neusten regionalen Klimaprojektionen (CH2018, 2018) wird sich der Klimawandel auch in absehbarer Zukunft in ähnlicher Tendenz auf die Schweizer Gewässer auswirken (FOEN, 2021). Für eine Auswahl Schweizer Einzugsgebiete (-10 Prozent) wurde für ein Klimaszenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) beispielsweise prognostiziert, dass die Wassertemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um weitere 3,5°C ansteigen könnten (Michel et al., 2022).

Hinweis

Eine ausführliche wissenschaftliche Publikation dieser Forschungsarbeit erscheint im HESS unter dem Titel «Multi-fidelity model assessment of climate change impacts on river water temperatures, thermal extremes and potential effects on cold water fish in Switzerland» (Raman Vina et al., 2025).

Aktueller Gewässerschutz

Der Schweizerische Gewässerschutz orientiert sich bei der Formulierung von Vorschriften für die thermische Nutzung an der Empfindlichkeit ausgewählter Fischarten, wobei die Überschreitung bestimmter Schwellenwerte verboten ist (Gewässerschutzverordnung 814.201).

Die Temperatur eines Fließgewässers darf durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3°C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5°C, verändert werden; dabei darf die Wassertemperatur 25°C nicht übersteigen. Diese Anforderungen gelten nach weitgehender Durchmischung.

Da die Schweiz mit einer mittleren Höhe von 1,350 m ü. M. ein Hochgebirgsland ist, werden die meisten Flüsse von der Bachforelle (*Salmo trutta fario*), einem Kaltwasserfisch, besiedelt (Brodersen et al., 2023). So wie für alle anderen Fischarten existieren auch für die Bachforelle bestimmte Temperaturbereiche, innerhalb derer optimale Bedingungen für Wachstum, Gesundheit oder Fortpflanzung herrschen. Da die Bachforelle eine besonders temperaturempfindliche Fischart ist, stellen wärmere Wassertemperaturen als 13°C eine Belastung für das Überleben des Laichs dar, wärmere Temperaturen als 15°C erhöhen die Anfälligkeit für parasitenbedingte Krankheiten stark und eine längere Exposition über 25°C kann zum Tod führen (Strepparava et al., 2018; Wehrly et al., 2007; Chiltonczyk et al., 2002; Elliott, 1994). Ein Musterbeispiel für eine wassertemperaturbedingte Bedrohung ist die ab 15°C gehäuft auftretende proliferative Nierenerkrankung (PKD), eine durch Parasiten verursachte Krankheit bei Bachforellen, die sich in Schweizer Einzugsgebieten immer weiter ausbreitet (Hari et al., 2006).

Forschungsansatz

Der gewählte Modellierungsansatz basiert auf einem mehrstufigen Verfahren, das zwei verschiedene semiempirische Modelle zur Simulation der Wassertemperatur umfasste. Hierbei wurden 22 gekoppelte und herunterkalierte allgemeine Zirkulations- und regionale Klimamodelle verwendet, ergänzt durch zukünftige Abflussprojektionen aus vier hydrologischen Modellen sowie drei Klimaszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5). Um möglichst präzise Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Was-

sertemperaturen in Flüssen zu erhalten, ohne dabei die dafür benötigte Rechenleistung auf ein untragbar hohes Niveau anzuheben, wurden Flussabschnitte, Einzugsgebiete und Quellflüsse mittels eines automatisierten, KI-unterstützten «Multi-Fidelity»-

Hydrologische Modellierung

Die Klimasimulationen aus dem Projekt CH2018 (CH2018, 2018) wurden für die Untersuchung zukünftiger Abflussprojektionen für 4 hydrologische Modelle im Projekt Hydro-CH2018 (FOEN, 2021) verwendet (M1 PREVAH-WSL: Brunner et al., 2019a; Brunner et al., 2019b, M2 PREVAH-UniBE: Muehli et al., 2021, M3 HBV Light-UniZH: Freudiger et al., 2021, M4 Alpine3D-EPFL: Michel et al., 2022). Für das Projekt Hydro-CH2018 wurden Projektionen für 61 der 82 Abflussmessstationen des BAFU (Bild 1) unter verschiedenen GCM-RCMs und 3 Klimaänderungsszenarien (RCP2.6, 4.5 und 8.5) erstellt.

Für die Modelle M1-M3 lagen kontinuierliche Abflussprojektionen mit täglicher Auflösung für den gesamten Zeitraum 1990–2099 vor, während die Projektionen des Modells M4 diskontinuierlich waren und nur die Zeiträume 1990–2000, 2005–2015, 2030–2040, 2055–2065 und 2080–2090 abdeckten. Die Simulationen der Flusstemperaturen an den Flussmessstationen, für die Abflussprojektionen aus den Modellen M1–M3 vorlagen, deckten den gesamten Zeitraum 1990–2099 ab, während für die Stationen, für die nur Abflussprojektionen aus dem Modell M4 vorlagen, nur Simulationen für die Zeiträume durchgeführt wurden, für die Daten vorlagen.

Die Messungen der historischen meteorologischen und hydraulischen Parameter, die für die Modellkalibrierung, -validierung und -fehlerkorrektur verwendet wurden, stammen in täglicher Auflösung von der Plattform IDAweb der MeteoSchweiz und der Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt BAFU (Zugriff am 18.6.2024). Für Messstellen, für die keine historischen Abflussdaten oder zukünftige Abflussprojektionen vorlagen, wurden ausschliesslich zukünftige Projektionen der oberflächennahen Lufttemperatur für die Simulation der Wassertemperatur verwendet. In den Fällen, in denen Klimaprojektionen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (z. B. 0,11° und 0,44°) zur Verfügung standen, wurde nur ein Modell in die Analyse einbezogen.

Modellierungsansatz (Rigon et al., 2022) in repräsentative thermische Regime gruppiert und entsprechend parametrisiert. 50 BAFU-Messstationen wurden dabei analog zu Michel et al. (2020) und Piccolroaz et al. (2016) in die Regime «Unterstromig See», «Mittelland», «Reguliert» und «Alpin» eingeteilt, 2 Messstationen wurden reklassifiziert und 30 Messstationen zum ersten Mal einem thermischen Regime zugeordnet (Bild 1). Der «Multi-Fidelity»-Ansatz hat zudem 2 bisher noch nicht zugeordnete BAFU-Messstationen aufgrund ihrer abweichenden Dynamik korrekterweise in ein neues, fünftes Regime «Grundwasserbeeinflusst» eingeteilt.

Definition thermischer Schwellenwerte

Über die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen thermische Schwellenwerte überschritten werden, können die Auswirkungen des Klimawandels auf Fische abgeschätzt werden (Michel et al., 2020). Das Auftreten von Überschreitungen bestimmter Schwellenwerte der Wassertemperatur in Flüssen auf einer täglichen Skala (Tagesmittelwerte) wurde entsprechend dazu verwendet, die historische Vergangenheit (1990 bis 2019)

und die prognostizierte Zukunft (2070 bis 2099) am Beispiel der Bachforelle (*Salmo trutta fario*) zu untersuchen. Drei thermische Schwellenwerte wurden gewählt:

1. Mortalität adulter Tiere, repräsentiert durch eine Tagesmitteltemperatur von über 25°C (Elliott, 1981; Wehrly et al., 2007), die auch als obere limitierende Grenze für die thermische Nutzung von Fließgewässern in der Schweiz festgelegt ist (GSchV 814.201).
2. Erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer proliferativen Nierenerkrankung (PKD) als Folge von Parasitenaktivität, repräsentiert durch eine Tagesmitteltemperatur von über 15°C (Chilmonczyk et al., 2002; Strepparava et al., 2018).
3. Die Sterblichkeit von Fischeiern (Laich) von September bis Januar, repräsentiert durch eine Tagesmitteltemperatur von über 13°C (Elliott, 1981).

Resultate

Entwicklung Fließgewässertemperatur

Der bedeutendste Einflussfaktor auf die zukünftigen Wassertemperaturen von Fließgewässern sind die Szenarien der Klimaän-

derung. Die Resultate zeigen, dass die mittleren Wassertemperaturen der Fließgewässer in der Schweiz bis Ende des 21. Jahrhunderts unter RCP8.5 voraussichtlich um 3,11±/−0,7°C (oder 0,36±/−0,1°C pro Dekade) ansteigen werden, während unter RCP2.6 der Temperaturanstieg bei tieferen 0,9±/−0,3°C (0,12±/−0,1°C pro Dekade) bleiben könnte. Unter RCP8.5 werden die Temperaturen der Flüsse des thermischen Regimes «Alpin» mit 3,5±/−0,5°C am stärksten ansteigen, gefolgt von Flüssen des Regimes «Unterstromig See», die um 3,4±/−0,5°C ansteigen.

Thermische Schwellenwerte

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Anzahl der Stationen, an denen die Tagestemperatur über dem definierten thermischen Schwellenwert liegen werden (Bild 2).

Unter dem Szenario RCP8.5 steigt die Anzahl der BAFU-Messstationen, an denen der Mortalitätsschwellenwert (25°C) überschritten werden könnte, von 4 auf 37 von insgesamt 54 Stationen der thermischen Regime «Unterstromig See» und «Mittelland» (Bild 2, a). Für die Stationen der thermischen

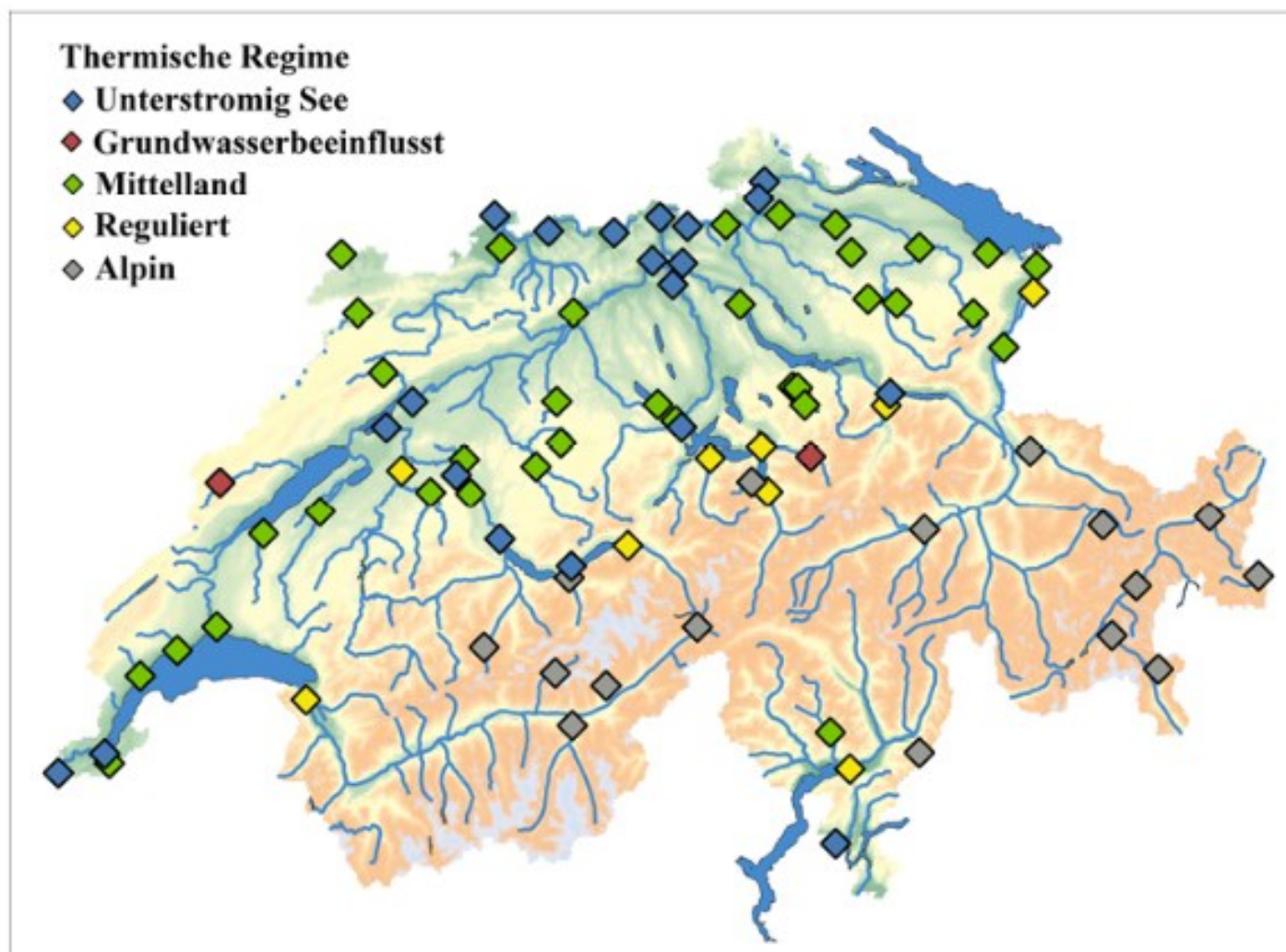


Bild 1: Thermisches Regime Klassifizierung der BAFU-Messstationen.

Regime «Reguliert», «Alpin» und «Grundwasserbeeinflusst» überschreitet keine BAFU-Messstation den Mortalitätsschwellenwert während der Referenzperiode, aber 1 von 26 Stationen könnte diese Schwelle in fernerer Zukunft überschreiten.

An den BAFU-Messstationen der Regime «Unterstromig See» und «Mittelland» wird der PCD-Schwellenwert (15°C) bereits im Referenzzeitraum oft überschritten (52 von 54 Stationen) und wird vermutlich für alle Stationen in der fernen Zukunft in der Zahl und in der Dauer ansteigen (Bild 2, b). Für die Stationen der thermischen Regime «Reguliert», «Alpin» und «Grundwasserbeeinflusst» überschreiten 2 von 26 Stationen den PCD-Schwellenwert bereits während der Referenzperiode. In der fernen Zukunft könnten 20 von 26 Stationen der thermischen Regime «Reguliert», «Alpin» und «Grundwasserbeeinflusst» den Schwellenwert von 15°C regelmässig überschreiten.

Für den Schwellenwert der Fischeiermortalität (13°C) überschreiten von September bis Januar alle Stationen des thermischen Regimes «unterstromig See» diesen Schwellenwert im Referenzzeitraum – und werden dies auch in der fernen Zukunft tun (Bild 2, c).

Diskussion

Die wahrscheinlichen Auswirkungen des Klimawandels unter dem RCP8.5-Szenario wurden für Bachforellen, eine Kaltwasserfischart die in Flüssen und Bächen in der ganzen Schweiz vorkommt, anhand bekannter thermischer Schwellenwerte (d.h. Mortalitätsrisiko bei 25°C und darüber; erhöhtes Auftreten von PKD über 15°C; erhöhte Laichmortalität bei 13°C zwischen September und Januar), analysiert (Broderson et al., 2023).

Obwohl Bachforellen bei Temperaturen von 30°C prinzipiell nach etwa 10 Minuten sterben können (Elliott, 1981), wurden die thermischen Schwellenwerte aufgrund der täglichen zeitlichen Auflösung der verwendeten Modelle nur auf einer täglichen Zeitskala (Tagesmittelwerte) ausgewertet. Auch bei der Betrachtung auf der täglichen Zeitskala sind die Ergebnisse dieser Studie besorgniserregend, da sowohl die Anzahl der Stationen als auch die Dauer der Temperaturschwellenüberschreitung zunehmen. Wenn man bedenkt, dass die Bachforellenfänge in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten bereits stark zurückgegangen sind, z. B. von 73 500 im Jahr 1989 auf 12 750 im Jahr 2019 in den Gewässern des Kantons Bern, die alle in der Schweiz vorkommenden Temperaturregime repräsentieren (FOEN,

2024), sind die Aussichten für die Zukunft der Bachforelle in Schweizer Fliessgewässern düster.

So wurde der Mortalitätsschwellenwert (25°C) in der Vergangenheit nur selten und nur an ganz wenigen BAFU-Messstellen überschritten (Bild 2, a). Bis zum Ende des Jahrhunderts wird der Mortalitätsschwellenwert jedoch an den meisten BAFU-Messstellen für die Temperaturregime «Unterstromig See» und «Mittelland» an mindestens einem Tag pro Jahr überschritten, so dass Gewässer, die bisher als sicher für Bachforellen galten, zumindest an einigen Tagen pro Jahr potenziell tödlich sind. Darüber hinaus ist der 25°C-Mortalitätsschwellenwert auch für die anthropogene Wassernutzung in der Schweiz von entscheidender Bedeutung, da die Schweizer Gesetzgebung die thermische Nutzung von Wasser zu Kühlzwecken oberhalb dieser Grenze verbietet.

Leider zeigen unsere Ergebnisse nicht nur ein vermehrtes Auftreten der Überschreitung des Mortalitätsschwellenwerts, sondern auch, dass der Temperaturschwellenwert für das vermehrte Auftreten von PKD (15°C) viel häufiger überschritten wird (Bild 2, b), ebenso wie der Temperaturschwellenwert für das Absterben von Fischlaich (13°C) (Bild 2, c). BAFU-Messstationen der Regime «Alpin» und in geringerem Masse auch des Regimes «Reguliert», für welche bisher keine kritischen thermischen Bedingungen für ein erhöhtes Auftreten von PKD zu beobachten waren, werden vermehrt kritische Bedingungen in den wärmeren Sommermonaten auftreten können. Mit weniger als 153 Tagen von September bis Januar sollte die Überschreitung der Temperaturschwelle für die Entwicklung von Fischlaich (ca. 30 bis 90 Tage; Alp et al., 2010) in den thermisch ausgeglichenen Gewässern der Regime «Mittelland», «Alpin» und «Grundwasserbeeinflusst» auch im 21. Jahrhundert nicht relevant sein. Wasserläufe im thermischen Regime «Unterstromig See» sind wahrscheinlich zu gross, um als Laichgewässer relevant zu sein, und wurden daher in dieser Analyse nicht weiter berücksichtigt.

Die hier durchgeführten thermischen Analysen klären nicht alle Prozesse, die die Empfindlichkeit von Fischen gegenüber extremen Temperaturen oder ihren Erfolg beim Laichen beeinflussen. Die Fähigkeit zur Wanderung, zur Suche nach lokalen Kaltwasserrefugien oder die Verfügbarkeit des zum Laichen benötigten Kiessubstrats wurden nicht explizit untersucht. Da jedoch starke Temperaturextreme, die die Fischsterblichkeitsschwelle von 25°C überschreiten, in der Regel in Verbindung mit niedri-

gen Abflüssen auftreten, sind die Möglichkeiten für Bachforellen, während solcher Extreme vorübergehend in Kaltwasserrefugien zu wandern, stark eingeschränkt. Und obwohl wir die Laichtemperatur nicht untersucht haben, ist es wahrscheinlich, dass längere Perioden hoher Fliessgewässertemperaturen im Herbst das Laichen der Bachforellen verzögern können. Darüber hinaus ist es aufgrund des erhöhten Abflusses und der Erosion im Winter wahrscheinlich, dass in Zukunft nicht mehr genügend Substrat zum Laichen zur Verfügung stehen wird (Junker et al., 2015).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein sich änderndes Klima den Stress für Bachforellen erheblich erhöhen wird, und angesichts der weiten Verbreitung dieser Fischart sind zukünftige Veränderungen der temperaturbedingten Mortalität bei ausgewachsenen Tieren von grosser Bedeutung.

Schlussfolgerungen

Im Schweizer Gewässerschutz basieren thermische Nutzungsvorschriften auf der Sensibilität einzelner Fischarten auf Gewässertemperaturen und der Festlegung von Temperaturgrenzwerten, um Vorschriften zur thermischen Nutzung umzusetzen.

Unsere Ergebnisse zeigen für die Zukunft deutliche Veränderungen in der Dauer und Häufigkeit von Schwellenwertüberschreitungen von Fliessgewässertemperaturen unter dem Einfluss des Klimawandels. Dies bedroht nicht nur die Bachforelle und andere Kaltwasserfische, sondern hat auch weitreichende Konsequenzen für die zukünftige anthropogene Nutzung der Schweizer Oberflächengewässer. Zu den lokalen und regionalen Massnahmen, die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Fliessgewässertemperaturen begrenzen können, gehören die Schaffung von Uferbeschattung (Trimmel et al., 2018), die Speicherseebewirtschaftung (Payne et al., 2004), die Flussrenaturierung, das Regenwassermanagement (Palmer et al., 2008) und ein künstliches Erhöhen der Grundwassereinfiltration in Fliessgewässern in Sommermonaten via künstlicher Grundwasseranreicherung in kälteren Jahreszeiten (Epting et al., 2023).

Letztendlich muss das Management bei der Reduzierung negativer Klimaauswirkungen sorgfältig die Notwendigkeit von Schutz- und Erhaltungsmassnahmen gegen die damit verbundenen Kosten und Nutzen abwägen, insbesondere im Vergleich zu den Konsequenzen eines nicht interaktiven, teilweisen oder umfassenden Ansatzes zur Bewältigung des Klimawandels.

Dank sagungen

Wir danken der Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung des Forschungsprojektes «Zukünftige Flusstemperaturen in der Schweiz

unter dem Klimawandel – SwissFuRiTe» (22.0007.PJ/5C2F04B23). Zudem danken wir Martin Schmid für die externe wissenschaftliche Qualitätskontrolle, Amber van Hamel für wertvolle Einblicke in die thermische Extremanalyse, Sebastiano Piccolroaz

für die Anleitung bei der Verwendung der air2stream- und der air2water-Modelle, Thilo Herold (BAFU) für die Projektbegleitung sowie der Freiwilligen Akademischen Gesellschaft (FAG) Basel für die finanzielle Unterstützung der Veröffentlichung.

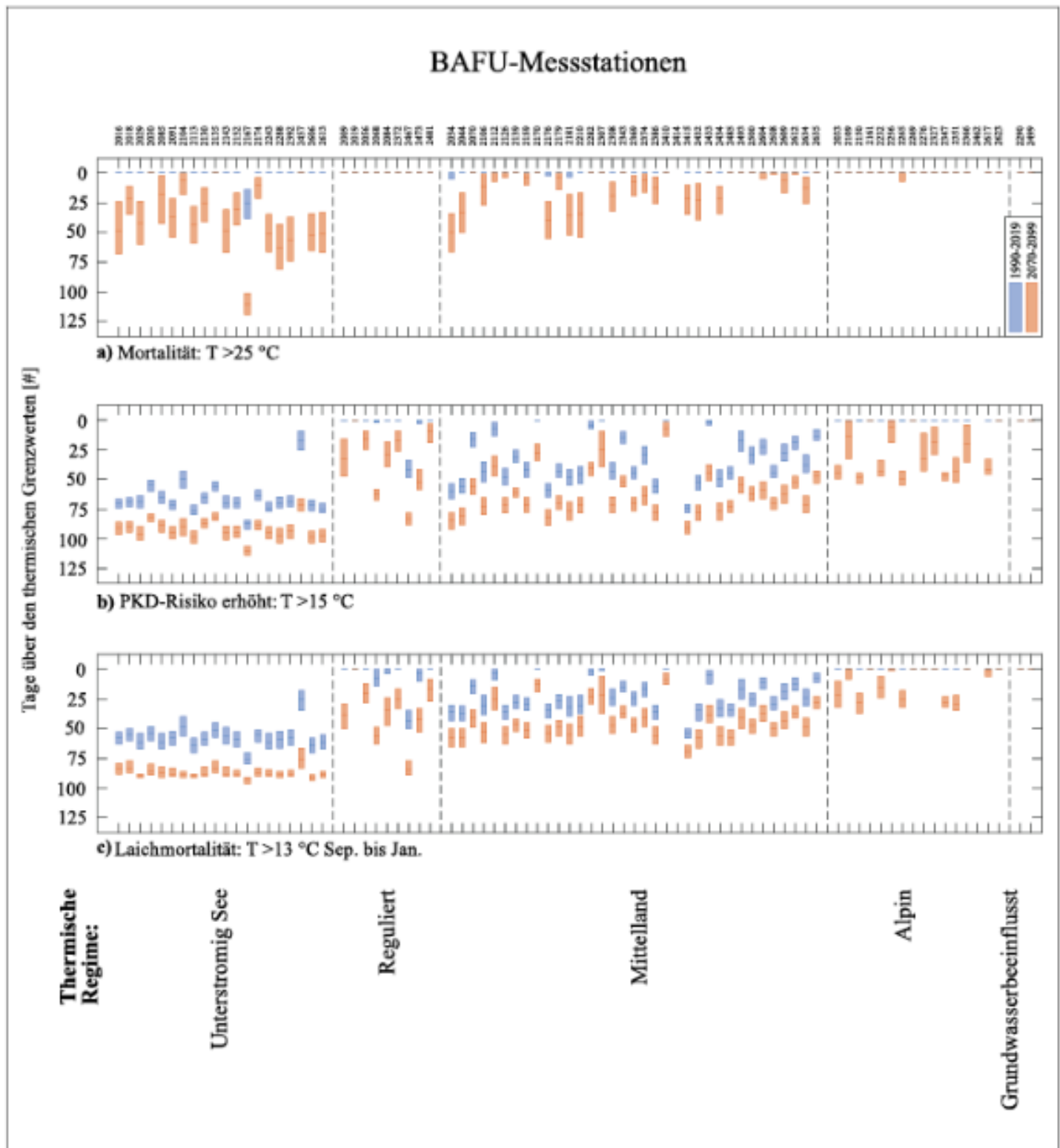


Bild 2: Anzahl der Tage, an welchen thermische Schwellenwerte für die Bachforelle für das Klimaszenario RCP8.5 überschritten werden. a) Mortalität bei Tagesmitteltemperaturen $> 25\text{ °C}$, b) erhöhtes Risiko für proliferative Nierenerkrankungen (PKD) bei Tagesmitteltemperaturen $> 15\text{ °C}$, Laichsterblichkeit von September bis Januar bei Temperaturen $> 13\text{ °C}$. Die Daten bestehen aus Klimasimulationen aus je 30 Jahren (blaue Balken 1990 bis 2019, rote Balken 2070 bis 2099), geordnet nach thermischem Regime. Dargestellt sind der Median (Balkenmittellinie) und das untere und obere Quartil (linke und rechte Balkenausdehnung) der Klimasimulation aus allen verfügbaren Klimamodellen (zusätzlich gemittelt, wenn mehrere hydrologische Modelle existieren), d. h. die Balkenausdehnungen zeigen die vom Klimamodell induzierte Variabilität für jede Periode mit jährlicher Auflösung. Die Stationen 2414 und 2462 sind nicht dargestellt, da für das Strömungsmodell M4 30 Jahre kontinuierliche Daten fehlten.

Quellen:

- BAFU (Hirsig, J.) (2020). Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- Barbarossa, V., Bosmans, J., Wanders, N., King, H., Bierkens, M. F. P., Huijbregts, M. A. J., & Schipper, A. M. (2021). Threats of global warming to the world's freshwater fishes. *Nature Communications*, 12(1), 1701. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21655-w>
- Birsan, M.-V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfander, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 312-329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.008>
- Brodersen, J., Hellmann, J., & Seehausen, O. (2023). Erhebung der Fischbiodiversität in Schweizer Fließgewässern. *Progetto Fiumi Schlussbericht*. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://doi.org/10.55408/eawag.30020>
- Brunner, M. L., Farinotti, D., Zekollari, H., Huss, M., & Zappa, M. (2019). Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4471-4489. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4471-2019>
- Brunner, M. L., Björnsen Garung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of The Total Environment*, 666, 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.109>
- CH2018 (2018). Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9575031-4-0.
- Chilmonczyk, S., Monge, D., & De Kinkelin, P. (2002). Proliferative kidney disease: cellular aspects of the rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), response to parasitic infection. *Journal of Fish Diseases*, 25(4), 217-226. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2761.2002.00362.x>
- Elliott, J. M. (1981). Some aspects of thermal stress on fresh-water teleosts. *Stress Fish* 209-245.
- Elliott, J. M. (1994). *Quantitative Ecology and the Brown Trout*. Oxford series in ecology and evolution, Band 7. Oxford University Press: 286. ISBN: 1746-3130.
- Epting, J., Rämán Vinná, L., Annette, A., Stefan, S., & Schilling, O. S. (2023). Climate change adaptation and mitigation measures for alluvial aquifers – Solution approaches based on the thermal exploitation of managed aquifer (MAR) and surface water recharge (MSWR). *Water Research*, 233, 118968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.118968>
- Ficklin, D. L., Hannah, D. M., Wanders, N., Dugdale, S. J., England, J., Klaus, J., et al. (2023). Rethinking river water temperature in a changing, human-dominated world. *Nature Water*, 1(2), 125-128. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00027-2>
- FOEN (2024). Catch statistics of Switzerland, Swiss Federal Office of Environment FOEN, Bern, Switzerland. URL: <https://www.fischerei-statistik.ch>
- FOEN (ed.) (2021). Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. Environmental Studies No. 2101: 125 p.
- Froediger, D., Vis, M., & Seibert, J. (2021). Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland, 49 pp.
- Hari, R., & Güttinger, H. (2004). Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978 bis 2002 – Auswertungen und grafische Darstellungen fischrelevanter Parameter (No. Teilprojekt 01/08). Fischnetz-Publikation, Eawag, Dübendorf, Switzerland.
- Hari, R. E., Livingstone, D. M., Sibat, R., Burkhardt-Holn, P., & Güttinger, H. (2008). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12, 10-20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01051.x>
- Junke, J., Heimann, F. U. M., Hauer, C., Turowski, J. M., Rickenmann, D., Zappa, M., & Peter, A. (2015). Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia*, 751(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2073-4>
- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaeffli, B., & Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 115-142. <https://doi.org/10.5194/hess-24-115-2020>
- Michel, A., Schaeffli, B., Wever, N., Zekollari, H., Lehning, M., & Huwald, H. (2022). Future water temperature of rivers in Switzerland under climate change investigated with physics-based models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(4), 1063-1087. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1063-2022>
- Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., & Martius, O. (2021). An ensemble of daily simulated runoff data (1981-2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). *Geoscience Data Journal*, gd(3), 17. <https://doi.org/10.1002/gdj.317>
- Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin. *Climatic Change*, 62(1-3), 233-256. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013694.18154.d6>
- Piccolroaz, S., Calamita, E., Majone, B., Gallice, A., Siviglia, A., & Toffolon, M. (2016). Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches. *Hydrological Processes*, 30(21), 3901-3917. <https://doi.org/10.1002/hyp.10913>
- Rigon, R., Fornetta, G., Bencheri, M., Tubini, N., D'Amato, C., David, O., & Messeri, C. (2022). HESS Opinions: Participatory Digital eRith Twin Hydrology systems (DARTHS) for everyone – a blueprint for hydrologists. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(18), 4773-4800. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4773-2022>
- Rämán Vinná, L. C., Bigler, V., Schilling, O. S., Epting, J. (2025). Multi-fidelity model assessment of climate change impacts on river water temperatures, thermal extremes and potential effects on cold water fish in Switzerland. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3957>
- Strepparava, N., Segner, H., Ros, A., Hartikainen, H., Schmidt-Posthaus, H., & Wahl, T. (2018). Temperature-related parasite infection dynamics: the case of proliferative kidney disease of brown trout. *Parasitology*, 145(3), 281-291. <https://doi.org/10.1017/S003182201700482>
- Trimmel, H., Weihs, P., Loidinger, D., Formayer, H., Kalny, G., & Melcher, A. (2018). Can riparian vegetation shade mitigate the expected rise in stream temperatures due to climate change during heat waves in a human-impacted pre-alpine river? *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 437-461. <https://doi.org/10.5194/hess-22-437-2018>
- Van Vliet, M. T. H., Ludwig, F., Zwolsman, J. J. G., Woodon, G. P., & Kabat, P. (2010). Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. *Water Resources Research*, 47(2), 2010WR009198. <https://doi.org/10.1029/2010WR009198>
- Van Vliet, Michelle T. H., Thorstlund, I., Strokal, M., Hofstra, N., Förke, M., Ehalt Macedo, H., et al. (2023). Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(10), 687-702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
- Van Vliet, Michelle T.H., Franssen, W. H. P., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23(2), 450-464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.002>
- Wehrly, K. E., Wang, L., & Mitro, M. (2007). Field-Based Estimates of Thermal Tolerance Limits for Trout: Incorporating Exposure Time and Temperature Fluctuation. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(2), 365-374. <https://doi.org/10.1577/T06-163J>

Autoren:

- Love C. Rämán Vinná**, Angewandte und Umweltgeologie, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel
- Vidushi Bigler**, Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFH-TI), Institut für Optimierung und Datenanalyse (IODA), 2501 Biel
- Oliver S. Schilling**, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel; Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser, Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, 8600 Dübendorf
- Jannis Epting**, Angewandte und Umweltgeologie, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel