

AQUA & GAS

07. Juli 2025

KLIMAWANDEL

Zukünftige Fließgewässertemperaturen

Der Klimawandel führte bereits nachweislich zu einem Anstieg der Wassertemperaturen in Schweizer Fließgewässern. Dieser Trend dürfte sich fortsetzen – wie stark, hängt von den Klimaschutzmassnahmen ab. So werden ohne entsprechende Massnahmen mittlere Fließgewässertemperaturen bis Ende des 21. Jahrhunderts um $3,11 \pm 0,7$ °C ansteigen, mit Massnahmen werden es $0,9 \pm 0,3$ °C sein. Die stärkste Erwärmung ist bei Fließgewässern im alpinen Raum zu erwarten, gefolgt von Fließgewässern unterstromig von Seen. Dies ergaben systematische Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts «Swiss Future River Temperatures – SwissFuRiTe».

Love Råman Vinnå, Jannis Epting, Vidushi Bigler, Oliver Schilling, 



Bereits jetzt hat der Klimawandel weltweit zu steigenden Fliessgewässertemperaturen geführt – ein Trend, der sich weiter fortsetzen dürfte [1, 2]. Wie stark sich Flüsse erwärmen – insbesondere während Hitzewellen und Dürreperioden –, wird nicht nur von oberflächennahen Lufttemperaturen beeinflusst, sondern auch von Faktoren wie Abflussmenge, Wechselwirkungen zwischen Flüssen und dem Grundwasser sowie anthropogene Aktivitäten. Zu Letzteren zählen Begradigungen von Flussläufen, Stauungen, Wassernutzungen für Kühlzwecke und Einleitungen von Abwasser oder Regenwasser, welche die Wasserqualität erheblich beeinträchtigen können [3, 4].

Auch in der Schweiz, dem Wasserschloss Europas, zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels deutlich. Sowohl Temperaturen [5] als auch die Abflüsse der Fliessgewässer [6] haben sich bereits verändert, wobei Veränderungen der Temperaturen als schwerwiegender bewertet werden als die des Wasserhaushaltes [7].

Gemäss den neusten regionalen Klimaprojektionen (CH2018; [8]) wird der Anstieg der Schweizer Gewässertemperaturen auch weiterhin mit dem Klimawandel Schritt halten [9]. So betrug die Erhöhung der Wassertemperatur in der Schweiz zwischen 1979 und 2018 im Mittel $0,33\text{ °C}$ pro Jahrzehnt, während die oberflächennahe Lufttemperatur um $0,46\text{ °C}$ pro Jahrzehnt zunahm [10]. Für etwa 10% der Schweizer Einzugsgebiete wird beispielsweise bei einem Szenario ohne Klimaschutzmassnahmen und hohen Emissionen (RCP 8.5) ein Anstieg der Wassertemperaturen um bis zu $3,5\text{ °C}$ bis Ende des 21. Jahrhunderts prognostiziert [11]. Angesichts dieser Prognosen, der hohen Vulnerabilität aquatischer

Arten gegenüber Temperaturanstiegen und der zunehmenden Nachfrage nach Flusswasser durch Landwirtschaft, Industrie und Gesellschaft ist es entscheidend, ein fundiertes räumliches und zeitliches Verständnis der zu erwartenden Temperaturerhöhungen für Schweizer Fliessgewässer zu entwickeln.

Mit diesem Ziel vor Augen wurde im Rahmen des vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanzierten Forschungsprojektes «Zukünftige Flusstemperaturen in der Schweiz unter dem Einfluss des Klimawandels» (*Swiss Future River Temperatures – SwissFuRiTe*) für die 82 vom BAFU betriebenen Abflussmessstationen eine landesweite Projektion der zukünftigen Wassertemperaturen durchgeführt.

FORSCHUNGSANSATZ

Im Rahmen der Studie wurden Multi-Fidelity-Modellierungsansätze entwickelt, die mittels statistischer Mustererkennung die Entwicklung der Fliessgewässertemperaturen unter dem Einfluss des Klimawandels effizient prognostizieren können. Der gewählte Modellierungsansatz basiert dabei auf einem mehrstufigen Verfahren, das zwei verschiedene semi-empirische Modelle zur Simulation der Wassertemperatur umfasst (*Box*).

Klassifizierung der Abflussmessstationen in thermische Regime

Für den *Multi-Fidelity*-Modellierungsansatz wurden die verschiedenen BAFU-Flussmessstationen in die vier thermischen Regime eingeteilt, die zuvor für die Schweiz identifiziert worden waren, einschliesslich der Regime «Unterstromig-See», «Mittelland», «Reguliert» und «Alpin» [10, 20]. Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Studie das thermische Regime «Grundwasserbeeinflusst» eingeführt (*Fig. 1*). Durch eine statistische Mustererkennung (Cluster-Analyse; [21]) auf der Basis der Wassertemperaturdaten wurde die Klassifizierung «Unterstromig-See» überprüft; von 20 Stationen entsprachen nach der Cluster-Analyse sieben dieser Klassifizierung.

Die Einteilung in thermische Regime ermöglichte den Einsatz differenzierter Modellierungsansätze und regimespezifischer Analysen. So zeigen die Messstationen des thermischen Regimes «Unterstromig-See» eine klare Entkopplung zwischen Fliessgewässertemperatur und -abfluss. Messstationen des Regimes «Mittelland» weisen einen jährlichen Abflusszyklus mit minimalem Abfluss im Sommer und starken Schwankungen zwischen den Jahren auf. Messstationen des Regimes «Reguliert» werden durch periodische Ausleitungen grosser Wassermengen aus oberstromig gelegenen Stauseen beeinflusst. Messstationen des Regimes «Alpin» zeigen, dass sowohl Abfluss als auch Temperatur stark von der Schnee- und Gletscherschmelze beeinflusst werden. Messstationen des Regimes «Grundwasserbeeinflusst» zeichnen sich durch ein nahezu konstantes Temperatursignal aus, das von der Lufttemperatur entkoppelt ist.

Hysterese-Analyse

Die Auswirkungen der Fliessgewässererwärmung durch Veränderungen des Abflusses wurde durch eine Hysterese-Analyse untersucht. Hysterese, ein häufiges Phänomen in der Hydrologie, beschreibt, wie eine abhängige Variable (z. B. Wassertemperatur oder Schwebstoffkonzentration) bei einem einzelnen Wert

der unabhängigen Variable (z. B. Abfluss) unterschiedliche Werte annehmen kann [1, 22–24].

Untersucht wurden historische und zukünftige Hysterese-Schleifen zwischen Wassertemperaturen (der abhängigen Variable) und Fliessgewässerabfluss (der unabhängigen Variable) mithilfe eines Index (*Zuecco*-Index; [25]), der für die vorliegende Untersuchungen angepasst wurde. Der angepasste Index teilt die Schleifen in vier Klassen (I bis IV) ein, je nach Drehrichtung (gegen oder im Uhrzeigersinn) sowie Anzahl und Grösse der Schleifen. Der Index funktioniert durch die Berechnung definitiver Integrale über Daten in ausgewählten Intervallen und wurde für Hysterese-Schleifen entwickelt, bei denen die unabhängige Variable von ihrem Anfangswert aus ansteigt, einen Spitzenwert erreicht und dann wieder abfällt. Darüber hinaus kann für Fliessgewässer in den Schweizer Haupttälern der Abfluss im Winter grösser sein als im Frühjahr oder Sommer – ein Effekt, der durch die anhaltende Klimaerwärmung durch reduzierte oder fehlende Schneedecke und Gletscherschmelze verstärkt wird [2, 9, 10]. Um diese umgekehrte Hysterese-Schleife berücksichtigen zu können, wurden zusätzlich vier «gespiegelte» Hysterese-Klassen (-I bis -IV) eingeführt (*Fig. 2*).

Definition der Temperaturextreme

Extreme Bedingungen sind nicht einfach zu definieren. Im Allgemeinen hängen sie davon ab, was im Vergleich zu «normalen» Bedingungen als extrem angesehen wird [26]. Ein weit verbreiteter Ansatz definiert hydrometeorologische Ereignisse als extrem, wenn sie unter oder über dem 10. oder 90. Perzentil einer Verteilung liegen [27]. Für die vorliegende Arbeit wurden Tageswerte der Wassertemperaturen als extrem hoch angesehen, wenn sie das 90. Perzentil in der 30-jährigen Referenzperiode, in der nahen (2030 bis 2059) oder der fernen Zukunft (2070 bis 2099) überschreiten.

Zusätzlich wurde für die vorliegende Studie ein Index für die Intensität extremer Ereignisse (IEE) definiert, mit dem die Veränderung der thermischen Extremamplitude bewertet werden kann. Der Index ist definiert als die Temperaturdifferenz zwischen dem 90. Perzentil und dem Median für jede Klimasimulation und jeden Zeitraum. Wenn die Temperaturdifferenz zunimmt, bedeutet dies, dass die Temperaturextreme heftiger werden, da die Temperaturspitzen im Vergleich zur mittleren Temperatur höher sind. Der IEE ist die Differenz zwischen dem 90. Perzentil und der Mediantemperatur, die 0 °C entspricht. Es ist zu beachten, dass durch die Definition der Extremereignisse am 90. Perzentil in jedem analysierten Zeitraum die zeitlich begrenzten Extremereignisse berücksichtigt werden.

RESULTATE

Entwicklung Fliessgewässertemperaturen

Der ausschlaggebendste Einflussfaktor für die künftigen Fliessgewässertemperaturen sind die Szenarien der Klimaänderung. Die Erwärmung der einzelnen Stationen von der Referenzperiode (1990–2019) über die nahe (2030–2059) bis zur fernen Zukunft (2070–2099) ist in *Figur 3* dargestellt. Unter dem RCP8.5-Szenario nimmt die Erwärmung der Fliessgewässertemperaturen während des gesamten 21. Jahrhunderts zu und beschleunigt sich sogar. Die geringste Veränderung der Fliessgewässertemperaturen

wurde beim RCP2.6-Szenario beobachtet, wobei die Erwärmung in der Mitte des 21. Jahrhunderts ein Plateau erreicht. Die mittlere Änderung der Fliessgewässertemperaturen vom Referenzzeitraum bis zur nahen und fernen Zukunft beträgt +0,77 bzw. +0,91 °C für RCP2.6, +0,95 bzw. +1,51 °C für RCP4.5 und +1,22 bzw. +3,18 °C für RCP8.5. Dies entspricht einer durchschnittlichen Erwärmungsrate von 0,36 °C pro Dekade für RCP8.5, 0,19 °C pro Dekade für RCP4.5 und 0,12 °C pro Dekade für RCP2.6. Die Fliessgewässertemperaturen verändern sich parallel zur oberflächennahen Lufttemperatur mit einer Rate von 0,50 °C pro Dekade unter RCP8.5, 0,26 °C pro Dekade unter RCP4.5 und 0,13 °C pro Dekade unter RCP2.6.

Die Auswirkungen des Klimawandels unterscheiden sich von Messstation zu Messstation, doch innerhalb der jeweiligen thermischen Regime können gemeinsame Muster erkannt werden (*Fig. 3*). Die stärkste Erwärmung der Fliessgewässer, unabhängig vom Klimaszenario oder der Zeitperiode, wurde für Messstationen des thermischen Regimes «Alpin» beobachtet, gefolgt von Messstationen des Regimes «Unterstromig-See», «Reguliert», «Mittelland» und «Grundwasserbeeinflusst» (in absteigender Reihenfolge). Unter RCP8.5 erwärmen sich die Fliessgewässer bei Messstationen des thermischen Regimes «Alpin» im Durchschnitt um 1,44 °C in naher und um 3,54 °C in ferner Zukunft, verglichen mit der Referenzperiode. Fliessgewässer bei Messstationen des thermischen Regimes «Unterstromig-See» erwärmen sich ebenfalls stark, um 1,36 °C in naher und 3,43 °C in ferner Zukunft. Im Vergleich zu den thermischen Regimen «Alpin» und «Unterstromig-See» erwärmen sich die Fliessgewässer mit Messstationen des thermischen Regimes «Reguliert» (nahe Zukunft +1,19 °C, ferne Zukunft +3,00 °C) und «Mittelland» (nahe Zukunft +1,06 °C, ferne Zukunft +2,75 °C) weniger stark. Am wenigsten betroffen waren mit grossem Abstand die Flusstemperaturen der Fliessgewässer mit Messstationen des thermischen Regimes «Grundwasserbeeinflusst» (nahe Zukunft +0,04 °C, ferne Zukunft +0,10 °C).

Hysterese-Analyse

Hysterese-Klassen konnten für alle Messstationen mit zukünftigen und aktuellen Abflüssen bestimmt werden (47 von 82 Messstationen).

Während der Referenzperiode (1990–2019) dominierte die Hysterese-Klasse IV (45,6%), gefolgt von III (25,0%), -I (14,7%), -II (11,8%) und I (2,9%). Keine Messstation wurde der Klasse II zugeordnet. Diese Verteilung blieb unverändert während der Referenzperiode unabhängig vom Klimaszenario oder hydrologischen Modell. In der nahen und fernen Zukunft zeigen sich jedoch in Abhängigkeit der Szenarien und Modelle Unterschiede.

Unter RCP8.5 wurde in der fernen Zukunft Klasse -I mit 48,5% dominant, gefolgt von IV (33,8%), III (13,2%) und -II (4,4%). Die Anzahl der Messstationen, die ihre Hysterese-Klasse änderten, stieg von 23% in der nahen Zukunft auf 51% in der fernen Zukunft. Unter RCP4.5 änderten 23% der Messstationen ihre Hysterese-Klasse bis zur nahen und 38% bis zur fernen Zukunft. Unter RCP2.6 änderten 28% bis zur nahen Zukunft die Hysterese-Klassen, 7% dieser Messstationen kehrten in der fernen Zukunft zurück zur ursprünglichen Klasse.

Die grössten Veränderungen in den Hysterese-Schleifenklassen in der fernen Zukunft zeigten Messstationen des thermischen Regimes «Mittelland» in der fernen Zukunft (58% unter RCP8.5, 42% unter RCP4.5, 12% unter RCP2.6). Messstationen des thermischen Regimes «Reguliert» zeigten unter RCP8.5 und RCP2.6 je 50% Veränderungen, während es unter RCP4.5 33% waren. Messstationen des thermischen Regimes «Alpin» wiesen die geringste Anfälligkeit für Veränderung in den Hysterese-Schleifenklassen auf (38% unter RCP8.5 und RCP4.5, 23% unter RCP2.6).

Figur 4 zeigt die Hysterese-Schleifen für vier repräsentative Messstationen unterschiedlicher thermischer Regime. Eine Änderung der Hysterese-Klasse ist in der Regel mit einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn und einer Streckung der Schleife von einer niedrigeren Klasse zu einer höheren Klasse (III bis IV) verbunden. Eine solche Drehung und Streckung ist das Ergebnis einer verstärkten Erwärmung der Fließgewässer in Verbindung mit einem Rückgang des Abflusses im Sommer, während die Erwärmung im Winter geringer ist als im Sommer und der Abfluss zunimmt.

Temperaturextreme

Die Analyse der Temperaturextreme konzentrierte sich auf Sommermonate (Juni bis August), wobei IIEE zwischen den Klimaszenarien variiert und sich je nach Messstation und thermischem Regime unterscheidet (*Fig. 5*). Zwischen der Referenzperiode (1990–2019) und der fernen Zukunft (2070–2099) nimmt IIEE im Mittel um +0,20 °C für das Szenario RCP2.6, um +0,38 °C für RCP4.5 und um +0,61 °C für RCP8.5 zu.

In der Referenzperiode war IIEE für Messstationen des thermischen Regimes «Mittelland» am stärksten (mittlerer IIEE +2,8 °C), gefolgt von den Regimen «Unterstromig-See» (+2,2 °C), «Reguliert» (+1,3 °C), «Alpin» (+1,1 °C) und «Grundwasserbeeinflusst» (+0,12 °C). Für alle Klimaszenarien nimmt IIEE im 21. Jahrhundert zu. Die stärkste Zunahme von der Referenzperiode bis in die ferne Zukunft wird an Messstationen des Regimes «Reguliert» beobachtet (mittlere Zunahme IIEE RCP2.6: +0,28 °C; RCP4.5: +0,54 °C, RCP8.5: +0,93 °C), gefolgt von Messstationen der Regime «Mittelland» (RCP2.6: +0,26 °C; RCP4.5: +0,48 °C, RCP8.5: +0,78 °C), «Alpin» (RCP2.6: +0,23 °C; RCP4.5: +0,45 °C, RCP8.5: +0,68 °C), «Unterstromig-See» (RCP2.6: +0,23 °C; RCP4.5: +0,40 °C; RCP8.5: +0,61 °C) und «Grundwasserbeeinflusst» (RCP2.6: +0,01 °C; RCP4.5: +0,01 °C; RCP8.5: +0,03 °C).

ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Modellansatz und Trendkorrekturen

Die Erforschung des Klimawandels erfordert die Analyse physikalischer Prozesse auf globaler, regionaler und lokaler Ebene. Auf kleineren Skalen ist ein höherer Detailgrad nötig, um den Wasserkreislauf angemessen abzubilden. In der vorliegenden Studie wurden hydrologische Modelle mit Klimamodellen verknüpft, um Wassertemperaturen zu simulieren und eine fundierte Bewertung der Auswirkungen des

Klimawandels zu gewährleisten. Ein *Multi-Fidelity*-Modellierungsansatz, der verschiedene hydrologische Modelle unterschiedlicher Komplexität kombiniert, ermöglichte dabei robuste Vorhersagen zu machen, während gleichzeitig die Berechnung für jede Station auf den jeweils optimalen Detailgrad eingestellt werden konnte.

So erlaubte die auf statistischem Lernen basierende Kopplung atmosphärischer und hydrometrischer Messstationen mit der Klassifizierung von Abflussmessstationen in thermische Regime eine optimale Selektion und Parametrisierung aus einer Vielzahl möglicher Modelle und Konfigurationen (*Fig. 1*).

Erwärmungsraten, Trends und Hysterese-Analyse

Der in der Schweiz beobachtete saisonale Unterschied in der Erwärmung der oberflächennahen Lufttemperaturen, mit einer stärkeren Erwärmung im Sommer als im Winter [8], konnte auch in den Projektionen der Fliessgewässertemperaturen festgestellt werden.

Unter den verschiedenen Messstationen konnten gemeinsame Muster und Trends bei der Erwärmung der Fliessgewässer der unterschiedlichen thermischen Regime identifiziert werden. Die Klassifizierung thermischer Regime wurde im Rahmen dieser Studie weiter verbessert, indem das thermische Regime «Grundwasserbeeinflusst» hinzugefügt und eine statistische Mustererkennung verwendet wurde, um die Abflussmessstationen neu zu gruppieren. So konnten die wichtigsten thermischen Einflüsse oberstrom einer bestimmten Messstation automatisch identifiziert werden (z. B. der thermische Einfluss eines Sees).

In Bezug auf die Gesamterwärmung zeigte sich die stärkste Erwärmung für Messstationen des thermischen Regimes «Alpin», gefolgt von den Regimen «Unterstromig-See», «Reguliert», «Mittelland» und «Grundwasserbeeinflusst» (*Fig. 3*). Die starke Erwärmung der Messstationen des thermischen Regimes «Alpin» hat ihren Ursprung im stärksten Trend der oberflächennahen Lufttemperaturerwärmung im Sommer, der in südlichen Teilen der Schweiz auftritt [8]. Die starke Erwärmung der Messstationen des thermischen Regimes «Unterstromig-See» lässt sich durch die längere Verweilzeit des Wassers in Seen im Vergleich zu Flüssen im Allgemeinen erklären (wodurch das Wasser mehr Zeit hat, sich zu erwärmen) und durch einen Unterschied in den saisonalen Mustern, Aspekte, die das verwendete *air2water*-Modell ausdrücklich berücksichtigt. Eine gekoppelte Fluss-See-Modellierungsstudie in der Schweiz (Aare bis Bielersee, Röhne bis Genfersee) zeigte einen Unterschied in den Erwärmungsraten von Epilimnion und Fluss von +0,03 bis +0,11 °C pro Dekade [28].

Schliesslich wurde durch die Verwendung und Erweiterung eines Indexes, der zur Klassifizierung von Hysterese-Schleifen entwickelt wurde [25], deutlich, dass die Klimaerwärmung die Hysterese-Schleifen der Fliessgewässer in Richtung eines Zustands mit höherer Temperatur und einer Abflussreduzierung verschiebt. Dies zeigt sich in einer Streckung der meisten Schleifen diagonal nach links oben (*Fig. 4*). Die Verschiebung resultiert aus der allgemeinen Abflussreduzierung sowie der verstärkten saisonalen oberflächennahen Lufttemperatur-Wassererwärmung, die während der Sommermonate auftritt. Zusammen erhöhen diese beiden Prozesse die Wassertemperatur überwiegend im Sommer.

Temperaturextreme

Der hier vorgeschlagene Index für die Intensität extremer Ereignisse (IEE) ermöglicht es, die Entwicklung von Extremtemperaturen zu untersuchen. IEE ist unabhängig von vergangenen extremen Bedingungen und bezieht die Extreme auf den untersuchten Zeitraum. Wie bei den Wassertemperaturerwärmungsraten und -trends wirkte sich die Wahl des Klimaszenarios am stärksten auf IEE aus, und zwar sowohl für die thermischen Regime als Ganzes als auch für die einzelnen Messstationen. Der stärkste Anstieg von IEE erfolgte unter dem RCP8.5-Szenario, gefolgt vom RCP4.5-Szenario. Bemerkenswert ist, dass beim RCP2.6-Szenario die Häufigkeit und Ausprägung von Extremereignissen während des gesamten 21. Jahrhunderts mehr oder weniger konstant blieb.

Betrachtet man IEE für die verschiedenen thermischen Regime, so traten während der Referenzperiode (1990–2019) hohe IEE an Messstationen der thermischen Regime «Mittelland» und «Unterstromig-See» auf. Für die ferne Zukunft (2070–2099) verbleiben unter allen Klimaszenarien die Messstationen der thermischen Regime «Mittelland» und «Unterstromig-See» mit den höchsten IEE, während die grösste Zunahme des IEE für Messstationen der thermischen Regime «Reguliert» und «Mittelland» zu beobachten ist. Da diese Messstationen sich hauptsächlich im Schweizer Mittelland im nordwestlichen Teil der Schweiz befinden (*Fig. 1*), sind sie diejenigen, für die unter dem RCP8.5-Szenario die ausgeprägtesten Niedrigwasserereignisse erwartet werden, insbesondere in den Sommermonaten, mit einer Abflussreduktion zwischen 5 und 60% [8, 9, 15, 16]. Da die Abflussprojektionen im verwendeten *Multi-Fidelity*-Modellierungsansatz direkt berücksichtigt wurden, ist die starke Zunahme des IEE für diese Stationen somit eine direkte Folge des erwarteten vermehrten Auftretens von Niedrigwasserereignissen, während die saisonalen oberflächennahen Lufttemperaturänderungen hauptsächlich für einen steigenden Median der Fliessgewässertemperaturen verantwortlich sind.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ein automatisierter *Multi-Fidelity*-Modellierungsansatz, bestehend aus herunterskalierten regionalen Klimamodellen, hydrologischen Einzugsgebietsmodellen und zwei semi-empirischen Wassertemperaturmodellen mit unterschiedlichem Grad an Parametrisierungskomplexität, wurde verwendet, um die zukünftigen Wassertemperaturen von Fliessgewässern in der Schweiz unter drei Klimaszenarien zu untersuchen. Der Modellierungsansatz wurde durch die Gruppierung von Fliessgewässern in unterschiedliche thermische Regime mit Hilfe einer statistischen Mustererkennung optimiert.

Die Simulationen zeigen, dass die durchschnittlichen Fliessgewässertemperaturen in der Schweiz unter dem Klimaszenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) um 3,0 °C (0,37 °C pro Dekade von 1990–2099) ansteigen werden, während die Temperaturen unter dem Szenario mit niedrigen Emissionen (RCP2.6) nur um 0,9 °C ansteigen. Die stärkste Erwärmung von Fliessgewässern ist für RCP8.5 im alpinen Raum zu erwarten (+3,5 °C), gefolgt von Fliessgewässern unterstromig von Seen (+3,4 °C). Eine allgemeine Verschiebung des Fliessgewässerabflusses mit weniger Abfluss im Sommer und mehr Abfluss im Winter

zusammen mit einer verstärkten Erwärmung im Sommer führt zu einer verstärkten saisonalen Erwärmung, welcher die für die verschiedenen Fließgewässer charakteristischen Hysterese-Schleifen verschiebt. Die Intensität extremer Ereignisse im Sommer nimmt unter RCP8.5 um durchschnittlich 0,6 °C zu, während der Anstieg beim Szenario mit niedrigen Emissionen (RCP2.6) auf 0,2 °C begrenzt war. Aufgrund zukünftiger niedriger Abflüsse wiesen die Messstationen des thermischen Regimes «Mittelland» während des Referenzzeitraums die höchsten IIEE auf, während die absoluten höchsten IIEE an den Messstationen des thermischen Regimes «Reguliert» zu beobachten sind (RCP2.6: +0,28 °C; RCP4.5: +0,54 °C; RCP8.5: +0,93 °C).

Ein effektives Management zur Abschwächung negativer Klimaauswirkungen erfordert eine Abwägung zwischen dem Schutz und der Erhaltung natürlicher Ressourcen sowie den damit verbundenen Kosten und Nutzen, um einen teilweisen oder vollständigen Klimaschutzansatz zu ermöglichen. Zu den lokalen und regionalen Massnahmen, die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässertemperaturen begrenzen können, gehören die Schaffung von Uferbeschattung [29], Staudamm-management [30], Flussrenaturierung [31] sowie Regenwassermanagement [32]. Eine weitere zu fördernde Massnahme ist die Grundwasserexfiltration in Fließgewässer in Sommermonaten via Grundwasseranreicherung in kälteren Jahreszeiten durch naturnahe Rückhalte- und Anreicherungsmaßnahmen [33, 34].

In diesem Zusammenhang kommt dem Grundwasser eine zentrale Rolle zu, da grundwasserbeeinflusste Fließgewässer nachweislich, und wie auch in dieser Studie gezeigt, resilienter gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels sind – sowohl heute als auch in der Zukunft. Diese Resilienz resultiert aus dem regulierenden Einfluss des Grundwassers, das Temperaturschwankungen puffert und so stabile Bedingungen für aquatische Ökosysteme schafft.

Darüber hinaus tragen Grundwassersysteme zur Aufrechterhaltung des Abflusses in Fließgewässern während Trockenperioden bei, was die Wasserverfügbarkeit sichert und die Auswirkungen von Dürreperioden auf Ökosysteme und menschliche Nutzungen abmildert. Diese Eigenschaften machen den Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen zu einem essenziellen Bestandteil effektiver Klimaanpassungsstrategien.

Bibliographie

[1] Van Vliet, M. et al. (2011): *Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow*. *Water Resources Research* 47(2): 2010WR009198.

[2] Van Vliet, M. et al. (2013): *Global river discharge and water temperature under climate change*. *Global Environmental Change* 23(2): 450–464.

[3] Ficklin, D. et al. (2023): *Rethinking river water temperature in a changing, human-dominated world*. *Nature Water* 1(2): 125–128.

- [4] Van Vliet, M. et al. (2023): Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment* 4(10): 687–702.
- [5] 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, Schweiz
- [6] Birsan, M.-V. et al. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology* 314(1–4): 312–329.
- [7] Barbarossa, V. et al. (2021): Threats of global warming to the world's freshwater fishes. *Nature Communications* 12(1): 1701.
- [8] CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0
- [9] BAFU (Hrsg.) (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.
- [10] Michel, A. et al. (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.
- [11] Michel, A. et al. (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.
- [12] Toffolon, M.; Piccolroaz, S. (2015): A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters* 10(11): 114011.
- [13] Piccolroaz, S. et al. (2013): A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(8): 3323–3338.
- [14] WMO (2017): WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals
- [15] Brunner, M. et al. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4471–4489.
- [16] Brunner, M. et al. (2019): Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of The Total Environment* 666: 1033–1047.
- [17] Muelchi, R. et al. (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*, gdj3.117.
- [18] Freudiger, D. et al. (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.

- [19] Råman Vinnå, L. et al. (2025): *Multi-fidelity model assessment of climate change impacts on river water temperatures, thermal extremes and potential effects on brown trout in Switzerland*. *EGUsphere*.
- [20] Piccolroaz, S. et al. (2016): *Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches*. *Hydrological Processes* 30(21): 3901–3917.
- [21] Bögli, R. (2020): *Time Series Clustering with Water Temperature Data*. University of applied sciences and arts Northwestern Switzerland (FHNW).
- [22] Gharari, S.; Razavi, S. (2018): *A review and synthesis of hysteresis in hydrology and hydrological modeling: Memory, path-dependency, or missing physics?* *Journal of Hydrology* 566: 500–519.
- [23] Tananaev, N. (2012): *Hysteresis effect in the seasonal variations in the relationship between water discharge and suspended load in rivers of permafrost zone in Siberia and Far East*. *Water Resources* 39(6): 648–656.
- [24] Webb, B. W.; Nobilis, F. (1994): *Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century*. *Hydrobiologia* 291(2): 105–113.
- [25] Zuecco, G. et al. (2016): *A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale*. *Hydrological Processes* 30(9): 1449–1466.
- [26] Stephenson, D. (2008): *Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events*. In H. F. Diaz & R. J. Murnane (Eds.): *Climate Extremes and Society* (1st ed., pp. 11–23). Cambridge University Press.
- [27] IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [28] Råman Vinnå, L. et al. (2018): *Tributaries affect the thermal response of lakes to climate change*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22: 31–51.
- [29] Trimmel, H. et al. (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.
- [30] Payne, J. et al. (2004): *Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin*. *Climatic Change* 62(1–3): 233–256.
- [31] Kurth, A.-M.; Schirmer, M. (2014): *Thirty years of river restoration in Switzerland: implemented measures and lessons learned*. *Environmental Earth Sciences* 72(6): 2065–2079.
- [32] Palmer, M. et al. (2008): *Climate change and the world's river basins: anticipating management options*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(2): 81–89.

[33] Epting, J. et al. (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* 238: 119988.

[34] Leibundgut, C.; Kohn, I. (2014): *European Traditional Irrigation in Transition Part II – Traditional Irrigation in our Time-Decline, Rediscovery and Restoration Perspectives*. *Irrigation and Drainage* 63(3): 294–314.

Datengrundlage und hydrologischer Modellierungsansatz

In dieser Studie wurde ein neuartiger Multi-Fidelity-Modellierungsansatz verwendet, der auf den zwei semi-empirischen Oberflächenwassertemperaturmodellen `nair2water` und `air2stream` [12, 13] basiert. Die Anwendbarkeit der Modellierungsansätze ermöglichte die Entwicklung optimaler standortspezifischer Modelle für alle 82 Abflussmessstationen des BAFU.

Als Datengrundlage (hydrologische Randbedingungen) wurden herunterskalierte Prognosen der bodennahen Lufttemperatur aus 22 gekoppelten Zirkulations- und regionalen Klimamodellen (GCM-RCM) aus 9 GCM und 8 RCM verwendet, die mit Projektionen zukünftiger Abflussmengen aus vier hydrologischen Modellen für drei Klimaszenarien (d. h. repräsentative Konzentrationspfade, i.e. mit Klimaschutzmassnahmen (RCP2.6), moderaten Klimaschutzmassnahmen (RCP4.5) und ohne Klimaschutzmassnahmen (RCP8.5)), gekoppelt wurden. Basierend auf den Empfehlungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO, [14]), wurden für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels kontinuierliche Daten aus 30 Jahren verwendet und drei Zeiträume ausgewählt, eine Referenzperiode (1990 bis 2019), ein Zeitraum in naher Zukunft (2030 bis 2059) und ein Zeitraum in ferner Zukunft (2070 bis 2099).

Die Klimasimulationen aus dem Projekt *CH2018* [8] wurden für die Untersuchung zukünftiger Abflussprojektionen für vier hydrologische Modelle im Projekt *Hydro-CH2018* [9] verwendet (M1 PREVAH-WSL: [15, 16]; M2 PREVAH-UniBE: [17]; M3 HBV Light-UniZH: [18]; M4 Alpine3D-EPFL: [11]). Im Rahmen des Projekts *Hydro-CH2018* wurden Projektionen für 61 der 82 Abflussmessstationen des BAFU (*Fig. 1*) unter verschiedenen GCM-RCM und drei Klimaänderungsszenarien (RCP2.6, 4.5 und 8.5) erstellt.

Die Messungen historischer meteorologischer und hydrologischer Parameter, die für die Modellkalibrierung, -validierung und -fehlerkorrektur verwendet wurden, stammen in täglicher Auflösung von der Plattform *IDAweb (MeteoSchweiz)* und der Abteilung Hydrologie des BAFU. Für Messstellen, für die keine historischen Abflussdaten oder zukünftige Abflussprojektionen vorlagen, wurden ausschliesslich zukünftige Projektionen oberflächennaher Lufttemperaturen für die Simulation der Wassertemperaturen verwendet. Standen Klimaprojektionen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (z. B. $0,11^\circ$ und $0,44^\circ$) zur Verfügung, wurde nur ein Modell in die Analyse einbezogen.

Da die Schweiz sich durch ihre ausgeprägte Topografie auszeichnet, ist die meteorologische Messstation, die einer Abflussmessstation am nächsten liegt, nicht unbedingt die ideale Partnerstation. Deshalb wurden meteorologische und hydrometrische Messstationen nach folgendem Verfahren gekoppelt: Es wurden nur Stationen berücksichtigt, für die (a) zukünftige Klimaprojektionen der oberflächennahen Lufttemperaturen (erforderlich) und des Fliessgewässerabflusses (optional, aber wünschenswert für verbesserte Wassertemperaturvorhersagen) für den gesamten Zeitraum von 1980 bis 2099 und (b) historische Messungen der oberflächennahen Lufttemperaturen und des Fliessgewässerabflusses von 1980 bis 2020

verfügbar waren. Die meteorologischen Messstation wurden anschliessend mit den Abflussmessstationen so gekoppelt, dass (a) die horizontale Entfernung zwischen hydrometrischer und meteorologischer Messstation minimal war (Kriterium «DIS»), (b) die meteorologische Messstation für die Bedingungen im oberstromig gelegenen Einzugsgebiet repräsentativ war (Kriterium «DRA») und (c) der Höhenunterschied zwischen den Messstationen den Schwellenwert von 200 m nicht überschritt (Kriterium «ELE»). Bestenfalls werden alle drei Kriterien eingehalten.

Aufgrund des beobachteten Unterschieds zwischen modellierten und gemessenen Trends wurde eine Trendbias-Korrektur auf die Ergebnisse des Temperaturmodells angewandt [19].

Danksagungen

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.

Hinweis

Eine ausführliche wissenschaftliche Publikation dieser Forschungsarbeit erscheint in der Fachzeitschrift *Hydrology and Earth System Sciences* (HESS) unter dem Titel «Multi-fidelity model assessment of climate change impacts on river water temperatures, thermal extremes and potential effects on brown trout in Switzerland» [19].

Kommentar erfassen

Vorname, Name

Betreff

E-Mail

Kommentar

Kommentar absenden

Kommentare (0)