

# BIOLOGISCHE GEWÄSSERBEURTEILUNG IM KLIMAWANDEL



**Als Folge des Klimawandels etablieren sich immer mehr wärmeliebende Arten in Schweizer Gewässern. Da wirbellose Kleinlebewesen als Bioindikatoren für die Qualität von Fließgewässern dienen, könnte diese Entwicklung die biologische Gewässerbeurteilung verfälschen. Simulationen zeigen, dass die Vielfalt der Wirbellosen tatsächlich zunehmen wird, jedoch auf Kosten kälteliebender Arten. Soweit sich das beurteilen lässt, sind die verwendeten Indizes aber robust genug, um ihre Aussagekraft zur Gewässerqualität für die nächsten Jahrzehnte zu behalten.**

*Christoph Vorburger; Imran Khaliq; Emma Chollet Ramampianandra; Anita Narwani; Nele Schuwirth, Eawag und ETH Zürich*

## RÉSUMÉ

### ÉVALUATION BIOLOGIQUE DES EAUX DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le réchauffement progressif des eaux, conséquence du changement climatique, crée l'opportunité de s'y installer pour un nombre croissant d'espèces aimant la chaleur. Les micro-organismes invertébrés sont d'importants indicateurs biologiques de la qualité des cours d'eau, c'est pourquoi il existe des raisons de craindre que ce développement puisse fausser l'évaluation biologique des eaux. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, l'Eawag a examiné comment les évolutions attendues du macrozoobenthos influent sur l'indice d'évaluation de la qualité des eaux (IBCH, SPEAR<sub>pesticides</sub>) et sur la diversité d'éphémères, de plécoptères et de trichoptères (EPT) dans différents scénarios de température. Les simulations montrent que la diversité du macrozoobenthos augmente avec la hausse de la température de l'eau, mais au détriment des espèces qui aiment le froid. Cela n'a pratiquement aucun effet sur l'indice SPEAR<sub>pesticides</sub>, mais l'IBCH aura alors tendance à augmenter, ce qui démontre une meilleure qualité des eaux. Cette augmentation reste cependant faible d'après les hausses de température réalistes pour ce siècle. Pour autant que l'on puisse en juger, les indices utilisés sont suffisamment fiables pour conserver leur pertinence en matière de qualité des eaux pour les prochaines décennies.

## HINTERGRUND

Die biologische Gewässerbeurteilung liefert wertvolle Grundlagen für den Vollzug des Gewässerschutzrechts und ist ein wichtiges Steuerinstrument der schweizerischen Gewässerpolitik. Verschiedene Organismengruppen dienen dabei als Bioindikatoren zur Erkennung von Gewässerabschnitten, die durch mangelnde Habitatstruktur, ungenügende Wasserqualität oder hydrologische Veränderungen beeinträchtigt sind [1]. Sie zeigen damit an, wo Massnahmen zu Verbesserung der Gewässerqualität angebracht sind (z.B. Revitalisierung), und können später auch zur Erfolgskontrolle herbeigezogen werden. Eine wichtige Rolle kommt dabei dem Makrozoobenthos zu. Das ist die Gemeinschaft jener wirbellosen Tiere am Gewässergrund, die noch von blossen Auge zu erkennen sind (> ca. 1 mm). Mit dem Modul «Makrozoobenthos Stufe F» des Modul-Stufen-Konzepts (MSK) wurde ihre Erhebung schweizweit vereinheitlicht [2]. Der rasch fortschreitende Klimawandel macht auch vor den Schweizer Gewässern nicht halt. Wie der Bericht des Bundesamts für Umwelt BAFU über das Hydro-CH2018-Projekt eindrücklich zeigt, sind die Wassertemperaturen in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen [3]. Und dieser Trend wird sich weiter fortsetzen. Die Erwärmung wirkt sich unweigerlich auf die Arten-

Kontakt: N. Schuwirth, [nele.schuwirth@eawag.ch](mailto:nele.schuwirth@eawag.ch)

(© AdobeStock)

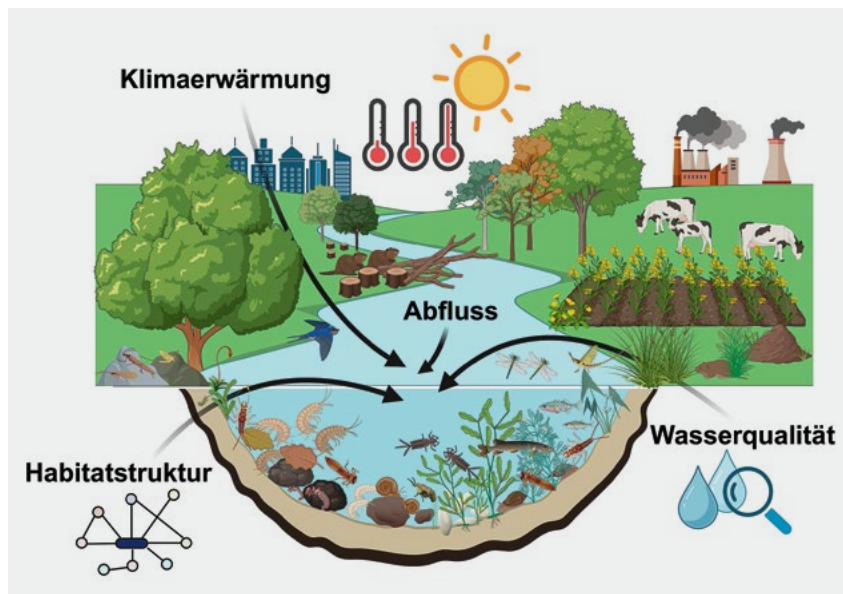


Fig. 1 Verschiedene Faktoren beeinflussen die Zusammensetzung des Makrozoobenthos in einem Gewässerabschnitt. Diese ist ein wichtiges Element für die biologische Beurteilung der Gewässerqualität. Die Unterscheidung klimabedingter von anderen Effekten ist entscheidend für die biologische Gewässerbeurteilung als Instrument einer Gewässerpolitik, die Fragen des Wasserbaus und der Wasserqualität regeln soll.

(Figur generiert mit BioRender.com)

gemeinschaft in Gewässern aus. An warme Gewässer angepasste Arten nehmen zu oder wandern aus wärmeren Gefilden ein, kälteliebende Arten nehmen ab oder verschwinden ganz aus ihren Gewässern [4]. In den Makrozoobenthos-Daten, die im Rahmen des *Biodiversitätsmonitorings Schweiz* (BDM; [5]) und der *Nationalen Beobachtung Oberflächengewässerqualität* (NAWA; [6]) erhoben werden, zeichnen sich diese Veränderungen bereits ab. So nahm die Anzahl nachgewiesener Familien und die Artenvielfalt innerhalb der EPT (*Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera* = Eintags-, Stein- und Köcherfliegen) im letzten Jahrzehnt tendenziell zu [7, 8]. Die erhobene Zusammensetzung des Makrozoobenthos in Fließgewässern bildet die Grundlage für die Berechnung verschiedener Indizes zur Beurteilung der

Gewässerqualität. Die wichtigsten sind der IBCH [2] und der SPEAR<sub>pesticides</sub>-Index [9]. Der IBCH berechnet sich aus zwei Komponenten, der Vielfalt der gesammelten Taxa (Diversitätsklasse) und der Empfindlichkeit einiger Indikator taxa (Indikatorgruppe), was eine Beurteilung des generellen Zustands eines Gewässerabschnitts erlaubt. Der SPEAR<sub>pesticides</sub>-Index misst den Anteil pestizid-empfindlicher Taxa in der gesamten Stichprobe und zeigt somit vor allem die chemische Belastung des Wassers an. Wenn sich nun die Artengemeinschaft in Fließgewässern durch die Klimaerwärmung verändert, stellt sich die Frage, ob diese Indizes ihre Aussagekraft behalten (Fig. 1). Würden zum Beispiel mehr wärmeliebende Taxa zuwandern als kälteliebende abwandern, könnte sich die Taxa-Vielfalt

erhöhen und dadurch die Beurteilung eines Gewässerabschnitts mittels IBCH verbessern, ohne dass sich an der Habitatstruktur, am Abflussregime oder der Wasserqualität etwas verändert hätte. Es wäre jedoch wünschenswert, die Auswirkungen der Gewässerqualität auf das Makrozoobenthos von den Auswirkungen des Klimawandels unterscheiden zu können, da sich nur erstere durch lokale Gewässerschutzmassnahmen beeinflussen lassen. Mit Unterstützung des BAFU hat die Eawag deshalb die zu erwartenden Veränderungen in der Zusammensetzung des Makrozoobenthos für verschiedene Klimaszenarien modelliert und die Auswirkungen auf die für die biologische Gewässerbeurteilung verwendeten Indizes untersucht [10]. Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Dies war das erste Projekt eines grösseren gemeinsamen Forschungsprogramms zum Einfluss des Klimawandels auf die aquatische Biodiversität (s. Box, S. 64).

## VORGEHEN

Das allgemeine Vorgehen bei dieser Untersuchung ist schematisch in *Figur 2* dargestellt. Es werden zwei Arten von Temperaturszenarien betrachtet: (1) Eine homogene Veränderung der sommerlichen Wassertemperaturen für die ganze Schweiz über den Bereich von  $-1^{\circ}\text{C}$  bis  $+8^{\circ}\text{C}$  (relativ zu 2019, zum Zweck einer Sensitivitätsanalyse) und (2) realistische Zukunftsszenarien basierend auf modellierten Wassertemperaturen in zwölf für die Schweiz repräsentativen Einzugsgebieten [11], jeweils für drei Szenarien des zukünftigen globalen Ausstosses von Treibhausgasen, nämlich RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 [12]. Diese Emissions-szenarien entsprechen konsequentem (RCP2.6 – Netto-Null bis 2100) mittlerem (RCP4.5 – Halbierung bis 2100) und

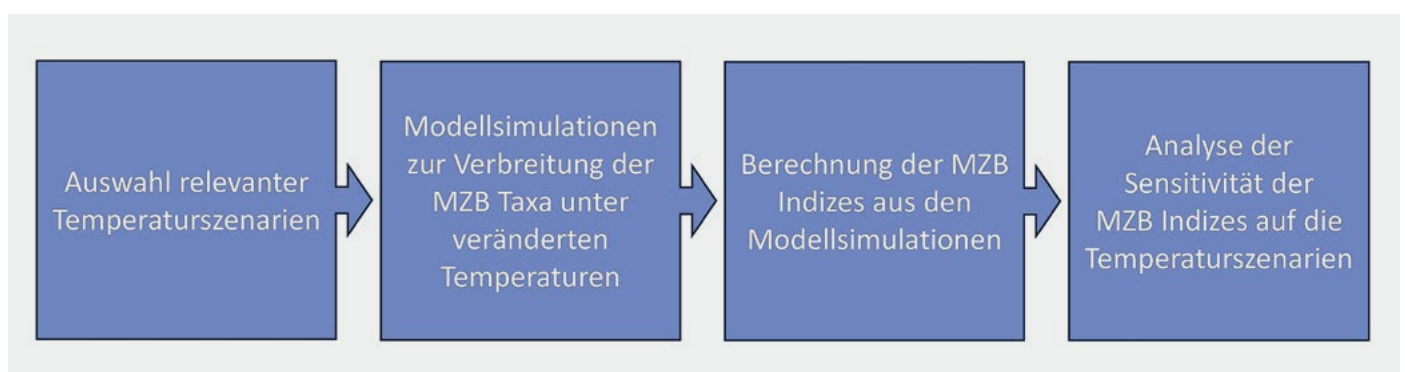


Fig. 2 Vorgehen der Untersuchung zur Auswirkung der Klimaerwärmung auf die biologische Gewässerbeurteilung.

fehlendem Klimaschutz (RCP8.5 – keine Reduktion), wobei ihre Auswirkung für drei zukünftige Zeitperioden simuliert werden: 2030–2040, 2055–2065 und 2080–2090.

Die Auswirkungen dieser Temperaturszenarien auf die Makrozoobenthos-Gemeinschaft wurden mit einem multivariaten Artverbreitungsmodell simuliert [13, 14]. Die Datengrundlage für dieses Modell bildeten die verfügbaren Daten des Schweizer Biodiversitätsmonitorings (BDM), der Nationalen Beobachtung Oberflächengewässerqualität (NAWA) sowie kantonaler Überwachungsprogramme der Fliessgewässer von insgesamt 1802 Probestellen für die Jahre 2010–2019. Neben der Temperatur berücksichtigt das Artverbreitungsmodell auch andere Einflüsse, wie die Fliessgeschwindigkeit oder die Landnutzung im Einzugsgebiet, was eine

bessere Vorhersage der Verbreitung und Häufigkeit der Makrozoobenthos-Taxa erlaubt. Für die Modellsimulationen mit den verschiedenen Temperaturszenarien wurden die anderen Faktoren dann aber konstant gehalten. Das ist nötig, um den Einfluss der Temperaturveränderung von anderen Einflüssen isolieren zu können. Es sei aber darauf hingewiesen, dass dies kein realistisches Abbild der zu erwartenden Veränderungen ist. Die Klimaerwärmung wird zum Beispiel auch die Abflussmengen und ihre zeitliche Verteilung über das Jahr verändern [3]. Für die modellierten zukünftigen Makrozoobenthos-Lebensgemeinschaften wurden folgende Indizes berechnet: IBCH mit seinen zwei Komponenten (Diversitätsklasse, Indikatorgruppe), SPEAR<sub>pesticides</sub> sowie für die auf Artniveau erhobenen EPT den Artenreichtum (Anzahl vorhandene Ar-

ten). Deren Werte wurden schliesslich mit heutigen Werten verglichen, um die Auswirkung der Temperaturveränderungen auf die biologische Gewässerbeurteilung abzuschätzen.

## ERGEBNISSE

### KLIMABEDINGTE ZUNAHME DES ARTENREICHTUMS ...

Die Artverbreitungsmodelle zeigen klar, dass es mit der fortschreitenden Klimaerwärmung zu weiteren Verschiebungen in der Verbreitung und der Häufigkeit vieler Makrozoobenthos-Taxa kommen wird. Insgesamt werden mehr Taxa zu- als abnehmen. Illustriert wird das am Beispiel des Modells für alle Probestellen und eine schweizweit homogene Veränderung der Wassertemperatur von +2 °C im Vergleich zu 2019. Das ist ein realistisches Szenario für die Temperaturen gegen Ende dieses Jahrhunderts bei relativ konsequentem Klimaschutz, der das globale Netto-Null-Ziel jedoch verfehlt. Unter dieser Annahme wird für 70% der Familien des Makrozoobenthos eine erhöhte und nur für 30% der Familien eine geringere Vorkommenswahrscheinlichkeit prognostiziert. Bei den Familien, die zu den für die Indikatorgruppe des IBCH relevanten Zeigertaxa gehören, ist sogar grossmehrheitlich eine höhere Vorkommenswahrscheinlichkeit zu erwarten (Fig. 3).

### ... MIT GERINGER AUSWIRKUNG AUF DIE GEWÄSSERBEURTEILUNG

Da der IBCH relativ stark von der Anzahl beobachteter Familien beeinflusst wird, ist also zu erwarten, dass die Klimaerwärmung seine Werte eher in positiver Richtung verschieben wird. Tatsächlich steigt der IBCH unter Annahme genereller Temperaturveränderungen von -1 bis +8 °C kontinuierlich an, und dieser Anstieg ist fast ausschliesslich durch die Zunahme der Diversitätsklasse bestimmt, während sich die Indikatorgruppe über diesen Temperaturbereich kaum verändert (Fig. 4a-c). Der SPEAR<sub>pesticides</sub>-Index bleibt ebenfalls sehr stabil über diesen weiten Temperaturbereich (Fig. 4e), während der EPT-Artenreichtum mit zunehmender Temperatur klar ansteigt (Fig. 4d). Beschränkt man sich wiederum auf ein für dieses Jahrhundert relevantes Szenario von +2 °C, bleiben die Auswirkungen jedoch durchwegs gering: Der IBCH würde um 4% ansteigen, der EPT-Artenreichtum um 7% und der

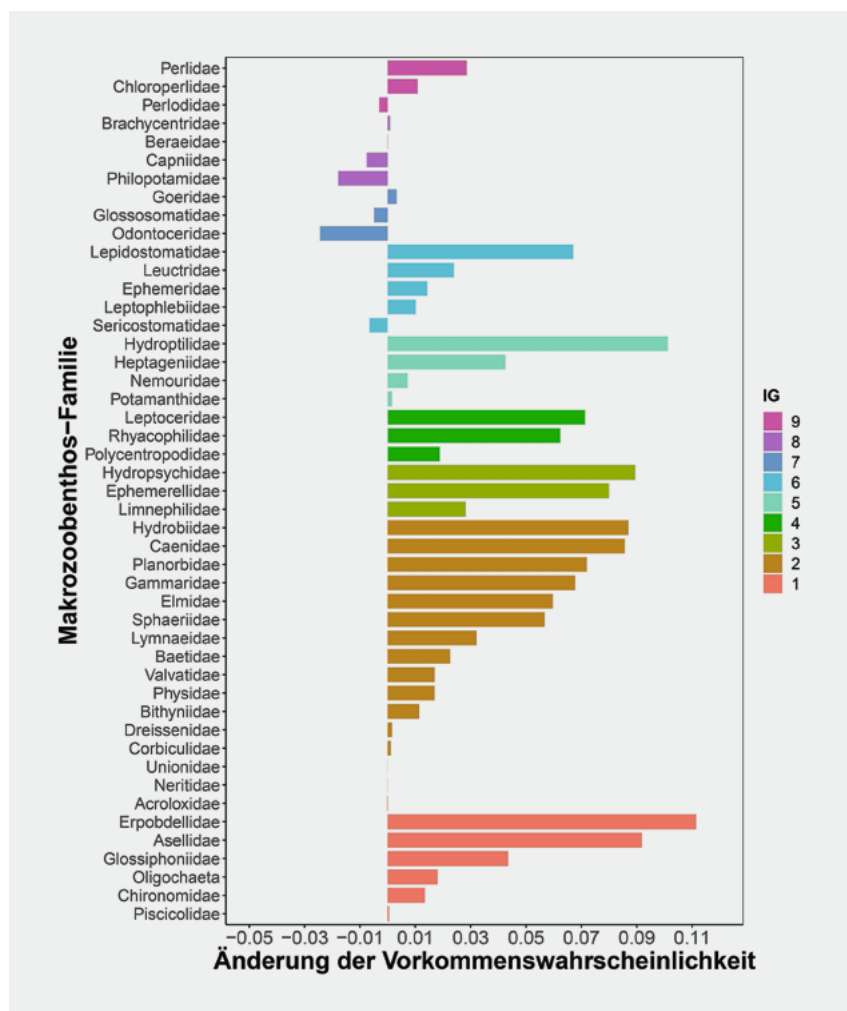


Fig. 3 Simulierte Änderungen der Vorkommenswahrscheinlichkeit aller Makrozoobenthos-Familien, die zu den Zeigertaxa der Indikatorgruppe des IBCH gehören. Unter Annahme eines schweizweiten Anstiegs der Wassertemperaturen um 2 °C würde die Mehrheit dieser Familien zunehmen. Die Farben bezeichnen die verschiedenen Indikatorgruppen von IG9 (sehr hohe Ansprüche an die Gewässerqualität) bis IG1 (geringe Ansprüche); (geändert aus Khaliq et al. [10]).

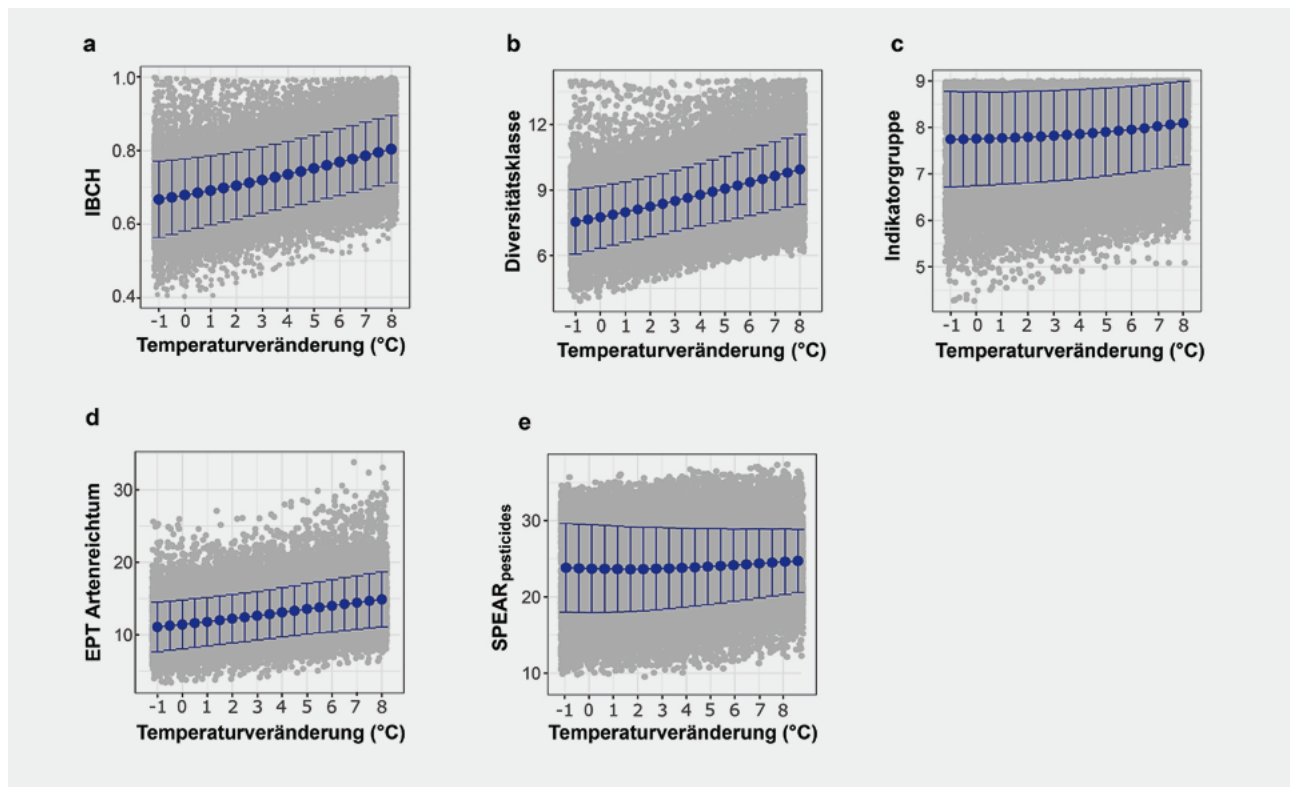


Fig. 4 Simulierte Werte verschiedener Indizes, die für die biologische Gewässerbeurteilung verwendet werden, unter Annahme einer schweizweiten Veränderung der Wassertemperaturen zwischen  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Sensitivitätsanalyse). Die Simulationen basieren auf einem multivariaten Artverbreitungsmodell. Graue Punkte zeigen die geschätzten Werte für alle Gewässerabschnitte ( $n = 1802$ ), die blauen Punkte die geschätzten Mittelwerte ( $\pm 95\%$  Konfidenzintervall). Die erste Zeile zeigt die Simulationen für den IBCH (a) und seine beiden Komponenten Diversitätsklasse (b) und Indikatorgruppe (c), die zweite Zeile den Artenreichtum der EPT-Taxa (Eintags-, Stein- und Köcherfliegen) (d) und den SPEAR<sub>pesticides</sub>-Index (e); (geändert aus Khaliq et al. [10]).

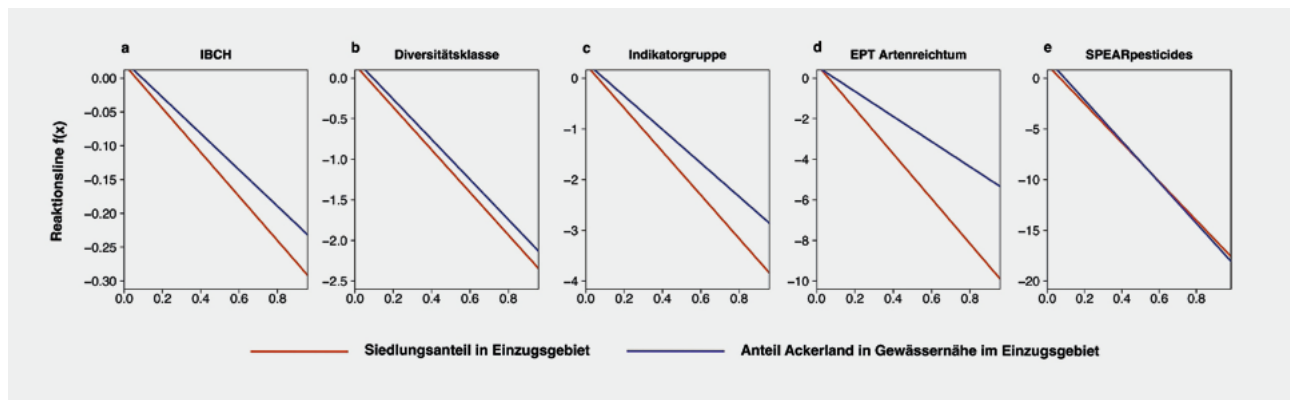


Fig. 5 Alle untersuchten Indizes für die biologische Gewässerbeurteilung zeigen signifikante lineare Abhängigkeiten vom Anteil Ackerland in Gewässernähe und vom Siedlungsanteil im Einzugsgebiet. Die Reaktionslinie  $f(x)$  zeigt, um wie viel die verschiedenen Indizes abnehmen mit zunehmendem Ackerland- bzw. Siedlungsanteil, unter Berücksichtigung der anderen Faktoren im statistischen Modell (z. B. Fließgeschwindigkeit, Temperatur etc.); (geändert aus Khaliq et al. [10]).

SPEAR<sub>pesticides</sub>-Index praktisch gar nicht. Das Ergebnis ist das gleiche, wenn statt eines generellen Anstiegs der Temperatur die unter drei Klimaszenarien vorhergesagten Wassertemperaturen in zwölf gut untersuchten Einzugsgebieten mit insgesamt 59 Probestellen als Modell-Input verwendet werden. Statistisch signifikante Anstiege des EPT-Artenreichtums und des IBCH bis gegen Ende dieses Jahr-

hunderts (Periode 2080–2090) sind nur für das pessimistische RCP8.5-Szenario (keine Emissionsverminderung) zu beobachten. Bei diesem Szenario würden die durchschnittlichen Wassertemperaturen um  $2,9\text{--}4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ansteigen. Bei den anderen beiden Szenarien, RCP2.6 und RCP4.5, würde der Anstieg der durchschnittlichen Wassertemperatur unter  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  bleiben, mit entsprechend gerin-

geren Auswirkungen auf die biologische Gewässerbeurteilung.

Sind die gängigen Indizes so robust gegenüber der zukünftig zu erwartenden Erwärmung, weil sie insgesamt (zu) wenig sensitiv auf Umwelteinflüsse reagieren? Nein. Wenn die geografische Variation in den Monitoringdaten von 2010–2019 mit multivariaten Modellen analysiert wird, haben viele mögliche Einflussfaktoren

einen signifikanten Einfluss auf einen oder mehrere der Indizes. So haben zum Beispiel der Anteil Ackerland am Gewässer ( $\leq 10\text{m}$ ) oder der Anteil Siedlungsgebiet im Einzugsgebiet signifikant negative lineare Effekte auf alle betrachteten Indizes (Fig. 5). Dass die Indizes so robust sind, liegt wohl eher daran, dass die Daten mit Ausnahme der EPT auf Familienebene erhoben werden, was zu relativ breiten

Temperaturtoleranzen für jede Familie führt, auch wenn es innerhalb der Familien allenfalls spezialisierte Arten gibt. Weiter heben sich die klimabedingten Verschiebungen zumindest teilweise auf. Mit zunehmender Temperatur wandern wärmeliebende Taxa zu oder werden häufiger, gleichzeitig nehmen kälteliebende Taxa aber auch ab, wobei ersteres insgesamt überwiegt (Fig. 2).

Schliesslich muss betont werden, dass die gemachten Modellvorhersagen mit Vorsicht zu interpretieren sind. Neben den unvermeidlichen Unsicherheiten beim Schätzen der Verbreitung vor allem für die selteneren Taxa scheint das Artverbreitungsmodell auch eine systematische Tendenz aufzuweisen. Dies wird evident, wenn es nicht für zukünftige, sondern für gegenwärtige Temperaturen angewandt

## PROJEKT «KLIMAWANDEL UND AQUATISCHE BIODIVERSITÄT»

Steigende Wassertemperaturen und veränderte hydrologische Verhältnisse infolge des Klimawandels wirken sich zunehmend auf Süswasser-Ökosysteme aus. Diese sind auch anderen negativen Einflüssen wie Verbauung und Verschmutzung ausgesetzt. Die gemeinsamen Auswirkungen der verschiedenen Stressfaktoren auf die biologische Vielfalt sind schwer vorherzusagen, denn es gibt Interaktionen zwischen den Stressoren, und sie wirken gleichzeitig auf viele Arten, die ebenfalls miteinander interagieren. Ihr Verständnis ist jedoch von entscheidender Bedeutung für einen evidenzbasierten Schutz der Artenvielfalt in Gewässern und für die Verwendung biologischer Indikatoren bei der Gewässerbeurteilung. Mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt geht die Eawag diese Herausforderung mit Modellen, Feldarbeit und experimentellen Ansätzen an. Das Forschungsprogramm «Klimawandel und aquatische Biodiversität» umfasst bisher drei Projekte:

### EINFLUSS DES KLIMAWANDELS AUF DIE BIOLOGISCHE GEWÄSSERBEURTEILUNG

Biologische Methoden zur Bewertung von Fliessgewässern, wie z. B. die Makrozoobenthos- und Fischmodule des Schweizer MSK (Modulstufenkonzept) basieren auf dem Vorkommen von Indikatortaxa. Aufgrund der globalen Erwärmung verschiebt sich die Verteilung der Arten derzeit hin zu mehr wärmeangepassten Arten. Wird sich diese Veränderung auf die Ergebnisse der biologischen Gewässerbeurteilung auswirken? Wenn ja, wäre es wichtig, die Auswirkungen der Erwärmung von den Auswirkungen anderer Stressfaktoren zu unterscheiden, da nur letztere durch die nationale Gewässerpolitik beeinflusst werden können. Unter Verwendung von Artverbreitungsmodellen in Verbindung mit Klimaprojektionen quantifiziert dieses Projekt die erwartete Auswirkung der Klimaerwärmung auf verschiedene Indizes für Gewässerqualität. Weiter werden Optionen vorgeschlagen und getestet, um erwärmungsbedingte Veränderungen mit einem «Kaltwasserindex» zu dokumentieren.

### AUSWIRKUNGEN DER ERWÄRMUNG UND WEITERER STRESSFAKTOREN AUF AQUATISCHE NAHRUNGSNETZE

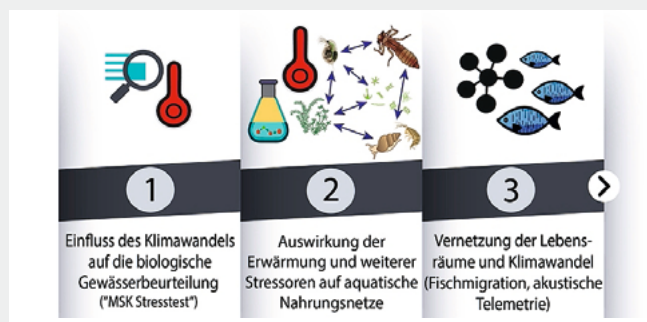
Neben dem raschen Anstieg der Wassertemperaturen kann auch der Eintrag von überschüssigen Nährstoffen, Pestiziden oder Feinsedimenten das Leben im Wasser beeinträchtigen. Um deren Auswirkungen auf die Biodiversität zu verstehen, muss über die Untersuchung der Effekte einzelner Stressoren auf einzelne Arten hinausgegangen werden. In diesem Projekt werden daher verschiedene Mesokosmen (replizierbare, künstliche «Klein-Ökosysteme») eingesetzt, um sowohl stehende als auch fließende Gewässerökosysteme zu simulieren. Darin wird untersucht, wie sich Erwärmung, Hitzewellen und anthropogene Stressfaktoren einzeln oder gemeinsam auf viele Arten gleichzeitig auswirken, und wie diese Effekte von der Struktur des Nahrungsnetzes abhängen. Die Erkenntnisse sollen der Umweltpolitik helfen, die negativen Auswirkungen auf die aquatische Biodiversität zu verringern.

### VERNETZUNG DER LEBENSÄUME UND KLIMAWANDEL (FISCHMIGRATION, AKUSTISCHE TELEMETRIE)

Dieses Projekt untersucht den Einfluss des Klimawandels auf die Bewegungsmuster von Fischen (<https://www.eawag.ch/de/abteilung/fishec/projekte/fish-movement-patterns/>). Für die Landmelioration, den Hochwasserschutz und die Wasserkraftproduktion wurden die Schweizer Flüsse stark kanalisiert und fragmentiert. Dies hat zum Aussterben von Arten geführt, die ins Meer abwandern müssen, wie z. B. Lachse oder Störe. Von Hindernissen im Flussnetz sind jedoch auch Arten betroffen, die im Süswasser verbleiben, aber während verschiedener Abschnitte ihres Lebenszyklus auf unterschiedliche Lebensräume angewiesen sind. Eine neuere Herausforderung für diese Fische, insbesondere für Kaltwasserarten, ist das zunehmende Auftreten von Hitzewellen infolge der globalen Erwärmung. Wandern die Fische aus betroffenen Gewässern ab? Können sie lebenswichtige Kaltwasserrefugien in den fragmentierten Flüssen überhaupt noch erreichen? Um solche und weitere Fragen zu beantworten, wird ein akustisches Telemetrie-Netzwerk im Rhein-Aare-Flussnetz aufgebaut. Dieses Netz von akustischen Empfängern wird eine detaillierte Überwachung der Bewegungen von markierten Fischen ermöglichen, um deren räumliche und zeitliche Bewegungsmuster aufzuzeigen.

### WEITERE INFORMATIONEN ZUM PROGRAMM

<https://www.eawag.ch/de/forschung/wasser-fuer-die-umwelt/biodiversitaet/klimawandel-und-aquatische-biodiversitaet/>



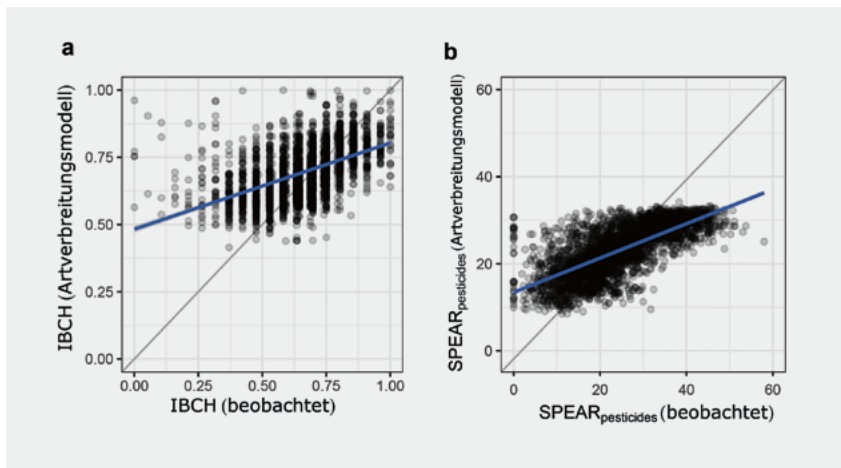


Fig. 6 Korrelationen der mittels Artverbreitungsmodell simulierten Werte für den IBCH (a) und den  $SPEAR_{pesticides}$ -Index (b) mit den beobachteten Werten für die Periode 2010–2019 ( $n = 1802$  Gewässerabschnitte). Die entsprechenden Regressionslinien (blau) haben eine Steigung von  $< 1$ , d. h. das Artverbreitungsmodell tendiert zu Überschätzung bei tiefen Werten und zu Unterschätzung bei hohen Werten. (geändert aus Khaliq et al. [10])

und mit den Monitoringdaten 2010–2019 verglichen wird. Zwar korrelieren die modellierten und die gemessenen Werte für IBCH und  $SPEAR_{pesticides}$  recht eng, aber die Steigung der entsprechenden Regressionslinie ist deutlich geringer als 1 (Fig. 6). Das bedeutet, dass diese Indizes im Bereich tiefer Werte eher über- und im Bereich hoher Werte eher unterschätzt werden, was die Sensitivität gegenüber Einflussfaktoren verringert. Daher ist die gemachte Abschätzung der Auswirkung höherer Wassertemperaturen auf die biologische Gewässerbeurteilung eher zu konservativ, und etwas stärkere Auswirkungen können nicht ausgeschlossen werden. Weiter ist zu beachten, dass in dieser Studie nur generelle Trends der Wassertemperaturen simuliert wurden, nicht aber die Häufigkeit von Hitzewellen oder mögliche Veränderungen des Abflussregimes, die zusätzliche Auswirkungen haben könnten.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die fortschreitende Klimaerwärmung wird bei den Makroinvertebraten der Schweizer Fließgewässer zweifellos zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung hin zu mehr wärmeliebenden Arten führen. Diese Thermophilisierung, wie der Prozess im Fachjargon heisst, wird die Artenvielfalt des Makrozoobenthos tendenziell erhöhen. Das sollte niemanden überraschen. Schliesslich nähert sich durch den Treibhauseffekt das Klima in der Schweiz zunehmend einem medi-

terranean Klima an, und die mediterrane Fauna ist in Europa generell artenreicher als jene der gemässigten Breiten. Leider ist mit dieser Entwicklung auch der Verlust kälteliebender Arten zu erwarten. Durch Simulation dieser Veränderungen mit Artverbreitungsmodellen wurde die biologische Gewässerbeurteilung einer Art Stresstest unterzogen. Dieser hat gezeigt, dass der  $SPEAR_{pesticides}$ -Index sehr robust ist gegenüber der Thermophilisierung, während der IBCH durch den Einfluss auf die Diversitätsklasse graduell zunehmen wird, wie auch der EPT-Artenreichtum. Im Bereich der für das laufende Jahrhundert zu erwartenden Temperaturanstiege wird diese Zunahme aber noch gering ausfallen. Soweit das im Rahmen der genannten Einschränkungen derzeit beurteilt werden kann, sollten also auch diese Indizes ihre Aussagekraft für die nächsten Jahrzehnte behalten.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BAFU ed. (2022): *Gewässer in der Schweiz. Zustand und Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 2207.* Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern. 90
- [2] BAFU ed. (2019): *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Fließgewässern (IBCH\_2019). Makrozoobenthos – Stufe F. 1. aktualisierte Ausgabe, November 2019; Erstausgabe 2010.* Umwelt-Vollzug Nr. 1026. Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern. 59
- [3] BAFU ed. (2021): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Umwelt-Wissen Nr. 2101.* Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern. 134
- [4] Khaliq, I. et al. (2024): *Warming underpins*

## DANK

Diese Studie wurde vom BAFU finanziert. Ein herzliches Dankeschön geht an *Bänz Lundsgaard-Hansen* für die aufmerksame Begleitung des Projekts und die hilfreichen Kommentare zu diesem Artikel. Wertvolle Unterstützung erhielten wir auch von *Rik Eggen, Christiane Ilg, Yael Schindler Wildhaber, Christian Stamm* und *Irene Wittmer*. Weiter danken wir *Markus Hermann* für die Fig. 1 und den Verantwortlichen von BDM und NAWA für den Zugang zu den Monitoringdaten.

community turnover in temperate freshwater and terrestrial communities. *Nature Communications*. 15(1): p. 1921

- [5] Koordinationsstelle\_BDM, ed. (2014): *Biodiversitätsmonitoring Schweiz BDM. Beschreibung der Methoden und Indikatoren. Umwelt-Wissen Nr. 1410.* Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern. 104
- [6] BAFU ed. (2013): *NAWA – Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität. Konzept Fließgewässer. Umwelt-Wissen Nr. 1327.* Bundesamt für Umwelt BAFU: Bern. 72
- [7] Gebert, F. et al. (2022): *Recent trends in stream macroinvertebrates: warm-adapted and pesticide-tolerant taxa increase in richness.* *Biology Letters*. 18(3): p. 20210513
- [8] Gebert, F. et al. (2022): *Zeitliche Trends von Makroinvertebraten. Kantonale und nationale Monitoringdaten im Vergleich.* *Aqua & Gas*. 102(10): p. 76–82
- [9] Liess, M.; von der Ohe, P.C. (2005): *Analyzing effects of pesticides on invertebrate communities in streams.* *Environmental Toxicology and Chemistry*. 24(4): p. 954–965
- [10] Khaliq, I. et al. (2024): *The effect of water temperature changes on biological water quality assessment.* *Ecological Indicators*. 159: p. 111652
- [11] Michel, A. et al. (2022): *Future water temperature of rivers in Switzerland under climate change investigated with physics-based models.* *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26(4): p. 1063–1087
- [12] IPCC (2013): *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press. 1535
- [13] Schuwirth, N. et al. (2019): *Analyse schweizerweiter Makrozoobenthosdaten. Erkenntnisse über anthropogene Einflüsse und Monitoring-Design.* *Aqua & Gas*. 99(12): p. 55–61
- [14] Caradima, B. et al. (2020): *Effects of site selection and taxonomic resolution on the inference of stream invertebrate responses to environmental conditions.* *Freshwater Science*. 39(3): p. 415–432