

Fische in der Klimakrise – denn wir wissen, was kommt

Christoph Chucholl¹, Sarah Oexle¹, Alexander Brinker^{1,2}

¹ Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg (LAZBW), Argenweg 50/1, 88085 Langenargen

² Limnologisches Institut der Universität Konstanz, Mainaustraße 252, 78464 Konstanz

Korrespondierender Autor

Christoph Chucholl
christoph.chucholl@lazbw.bwl.de

Eingereicht: 19.12.2022

Begutachtet: 18.01.2023

Erhalt 1. Überarbeitung: 16.05.2023

Begutachtet: 30.05.2023

Erhalt 2. Überarbeitung: 15.06.2023

Akzeptiert: 21.06.2023

Zitierhinweis

Chucholl, C., Oexle, S., Brinker, A. (2023): Fische in der Klimakrise – denn wir wissen was kommt. Zeitschrift für Fischerei 3: Artikel 6: 1-12.
DOI: 10.35006/fischzeit.2023.21

Verantwortlicher Redakteur

Robert Arlinghaus
ra@zeitschrift-fischerei.de

Finanzierung

Keine

Interessenkonflikt

Keiner.

Copyright

© Autore(n) 2023, veröffentlicht unter der creative commons Lizenz [CC-BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
www.zeitschrift-fischerei.de

Zusammenfassung

Gegenwärtig steuert die Weltgemeinschaft auf eine globale Erwärmung von 2,1 - 3,9 °C zum Ende des Jahrhunderts zu. Die Häufigkeit und Verbreitung von fischereilich relevanten Artengruppen wird sich dadurch in fundamentaler Weise verändern. Vorausschauendes Fischerei- und Artenschutzmanagement muss diese Verwerfungen antizipieren, um rechtzeitig und wirksam reagieren zu können. Dieser Essay beleuchtet anhand von aktuellen Fallstudien wahrscheinliche Arealveränderungen ausgewählter Fischarten in Südwestdeutschland und zeigt die Konsequenzen der Klimakrise für die langfristige Wirksamkeit von FFH-Schutzgebieten für Fische, Neunaugen, Flusskrebse und Großmuscheln auf. Unter realistischen Zukunftsannahmen werden gut geeignete Lebensräume für die kälteliebende Bachforelle in Baden-Württemberg bis ca. 2070 um rund 80 % abnehmen und sich in größere Höhen verlagern, während geeignete Lebensräume für die eurythermen Generalisten Rotaugen und Flussbarsch im Gegenzug deutlich zunehmen und sich möglicherweise sogar verdoppeln. Für die deutsche FFH-Fauna zeigt sich auf kontinentalem Maßstab ein Trend zu Arealverschiebungen in nordöstlicher Richtung und/oder größere Höhenlagen. Ein Drittel bis über die Hälfte der Anhang II-Arten, darunter Flussperl- und Bachmuschel, Steinkrebs, Bachneunauge, Groppe, Huchen, Steinbeißer und Schlammpeitzger sowie verschiedene Donau-Endemiten, werden dadurch bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als 75 % der derzeit ausgewiesenen FFH-Gebiete als gut geeigneten Lebensraum verlieren. Anders als landlebende oder nur zeitweilig im Wasser lebende Artengruppen, haben Fische als hololimnische Taxa nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten ihrer Klimanische zu folgen und in neu geeignete Lebensräume oder Schutzgebiete einzuwandern. Ein effektives Gegensteuern erfordert daher wesentlich mehr aktives Handeln als in Landlebensräumen und umfasst Förderung der natürlichen Klimaresilienz, Wiederherstellung der Längs- und Quervernetzung, gezielte Ansiedlungen, Identifikation und Schutz von Klimarefugien sowie Erhalt der genetischen Vielfalt als mögliche Anpassungsmaßnahmen.

Schlagworte: Klimawandel, Klimaanpassung, Natura 2000-Gebiete, Nischenmodelle, Artverbreitung

Abstract

Given current pledges and policies, the earth system is on a trajectory towards a warming of 2.1 - 3.9 °C by the end of the century. This will inevitably affect the distribution and abundance of freshwater taxa relevant for inland fisheries. Anticipating these changes is vital to effective fishery and conservation management. Here, we present two case studies that i) quantify likely distributional range shifts of selected fish species in southwestern Germany and ii) evaluate the long-term effectiveness of designated Natura 2000 sites for threatened freshwater fish, lampreys, crayfish, and bivalves under projected climate change. Under realistic assumptions, the potential range of the stenothermic cold-adapted brown trout in southwestern Germany is expected to decline by approximately 80 % by 2070 and to shift into higher elevations. In contrast, habitat suitability for the eurytherm generalists perch and roach is predicted to increase by up to 100 %. At the continental scale, climate change triggers a distributional shift in a north-eastward direction and to higher elevations in most of the Annex II species that permanently inhabit freshwaters in Germany. As a consequence, one third to more than half of the species were predicted to face unsuitable conditions in ≥ 75 % of currently designated Natura 2000 sites by the end of the century. In contrast to terrestrial or merolimnic species, ho-

lotimnic taxa, such as fish, crayfish, and bivalves, have only limited possibilities to track environmental change and to move into newly suitable habitats or protected areas. Mitigation of the threat posed by climate change requires therefore more dynamic management and proactive conservation planning than in terrestrial ecosystems. Fostering climate resilience of freshwater habitats, restoring stream connectivity, assisted migration, and identification and protection of climate refugia, as well as preservation of genetic diversity represent possible key actions to overcome climate change-related risks.

Keywords: Climate change, climate adaption, Natura 2000 sites, environmental niche models, species distribution

Fazit für die Praxis

Die Häufigkeit und Verbreitung von Fischarten wird sich durch die menschengemachte Klimakrise in fundamentaler Weise verändern. Gegenwärtig noch weitverbreitete, dominante Arten der Gewässeroberläufe werden stark zurückgehen, während in den Mittel- und Unterläufen eine Homogenisierung der Fischfauna einsetzt. Es besteht die reale Gefahr, dass bestimmte Formen der Fischerei wie das beliebte Fliegenfischen auf Forelle oder Äsche massiv eingeschränkt und vielerorts nicht mehr möglich sein werden. Die Entkopplung von gegenwärtig ausgewiesenen FFH-Gebieten und zukünftig gut geeigneten Fischlebensräumen untergräbt zudem die langfristige Wirksamkeit des Natura 2000-Netzes für den europäischen Fischartenschutz. Die absehbare Veränderung von Verbreitungsarealen stellt zuletzt auch die Gewässerüberwachung und -bewertung vor gewaltige Herausforderungen. Denn Referenzzustände und Zielvorgaben sind oftmals an Leitbilder geknüpft, die von historischen Verbreitungen und Bestandssituationen abgeleitet wurden, angesichts der Klimakrise aber kaum mehr zu erreichen sein werden. Unter dem Strich ist eine vorausschauende Auseinandersetzung mit dem Klimawandel das wohl wichtigste Zukunftsthema der Fischerei. Die Initiierung der „Zukunftskommission Fischerei“ sollte daher auch Anlass für ein Neudenken der zukünftigen fischereilichen Rahmenbedingungen und des fischereilichen Handelns sowie des Fischartenschutzes im Hinblick auf eine nachhaltige Klimaanpassung sein.

1. Wind Of Change

Gegenwärtig steuert die Weltgemeinschaft auf eine globale Erwärmung von 2,1-3,9 °C zum Ende des Jahrhunderts zu (LIU & RAFTERY, 2021; KEMP et al., 2022). Viele Landgebiete erwärmen sich dabei deutlich stärker als der globale Durchschnitt, wodurch Binnengewässern einer überdurchschnittlichen Erwärmung ausgesetzt sind. Ähnlich hohe Globaltemperaturen traten zuletzt vor dem Pleistozän, d. h. vor 2,6 Millionen Jahren auf. Die Geschwindigkeit des heutigen Temperatursprungs ist dabei beispiellos in den letzten Jahrtausenden und entspricht etwa dem zehnfachen der postglazialen Erwärmungsrate.

Die Häufigkeit und Verbreitung von Fischarten wird sich dadurch in fundamentaler Weise verändern. Als wechselwarme Organismen sind Fische, Neunaugen, Krebse und Muscheln (nachfolgend vereinfacht als gesetzliche „Fische“ zusammengefasst) unmittelbar von Temperaturänderungen betroffen, zudem sinkt mit der Erwärmung direkt die Sauerstoffverfügbarkeit. Die Qualität und Verfügbarkeit von Süßwasserlebensräumen wird ganz grundsätzlich vom Niederschlagsregime bestimmt (ISAAK & RIEMAN, 2013; COMTE & OLDEN, 2017). Weitere Stressoren wie bspw. Defizite in der Durchgängigkeit, Strukturarmut oder Schadstoffeinleitungen werden durch den Klimawandel in ihrer Wirkung zudem oftmals verstärkt und verringern ihrerseits die Klimaresilienz der Gewässerökosysteme. Degradierete Gewässerlebensräume sind somit besonders anfällig für negative Klimafolgen (TICKNER et al., 2020).

Klimaveränderungen beeinflussen alle Ebenen der biologischen Organisation, vom individuellen Fisch bis zu ganzen

Artengemeinschaften, auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Maßstäben (HEINO et al., 2016). Während einzelne Tiere unter anderem mit kurzfristigen Verhaltensänderungen, beispielsweise Inaktivität oder Meidverhalten, reagieren, führt die Klimaerwärmung auf Populationsebene zu einer Verringerung der Körpergröße und veränderten saisonalen Entwicklungs- und Wachstumsabläufen, wodurch es zur zeitlichen Entkopplung natürlicherweise synchroner Prozesse kommen kann (DAUFRESNE et al., 2009; HEINO et al., 2016; COCKREM, 2022). Die auf Artniveau gravierendste Reaktion auf den Klimawandel ist schließlich die langfristige Veränderung von Verbreitungsarealen (COMTE et al., 2013; MARKOVIC et al., 2014; MAIRE et al., 2019). Für lokale Fischgemeinschaften bedeutet das Umbrüche im Artenbestand und Veränderungen ihrer phylogenetischen und funktionellen Zusammensetzung (BUISSON et al., 2008).

Die zunehmenden Wetterextreme der letzten Jahre, darunter spektakuläre Hitze- und Dürreereignisse sowie fatale Hochwasser, haben die gegenwärtigen Folgen für die Fischfauna in den Fokus gerückt. Das bisher Erlebte ist dabei erst der Anfang einer sich stetig verschärfenden Entwicklung, deren Endpunkt auch zum Ende des Jahrhunderts noch nicht erreicht sein wird (MEINSHAUSEN et al., 2020; LYON et al., 2022).

Besonders die langfristigen Konsequenzen der Klimakrise sind in ihrer Folgeschwere kaum zu überschätzen: Die Klimanischen der Fischarten, welche den grundlegenden Rahmen ihres möglichen Verbreitungsareals definieren, verschieben sich mit – aus erdgeschichtlicher Sicht – rasanter Geschwindigkeit quer über den Kontinent.

Welches Gefährdungspotenzial das für die Fischerei und den Fischartenschutz konkret bedeutet, beleuchtet dieser Essay anhand von zwei Beispielen:

i) Arealveränderungen ausgewählter Fischarten in Südwestdeutschland (BASEN et al., 2022b) und

ii) Folgen des Klimawandels für die langfristige Wirksamkeit der Natura 2000-Schutzgebiete (BASEN et al., 2022a).

Kluges und vorausschauendes Fischerei- und Artenschutzmanagement muss diese grundlegenden Verwerfungen antizipieren, will man sich der rasch entfaltenden Realität des Klimawandels entgegenstellen und rechtzeitig zielgerichtete Anpassungsmaßnahmen entwickeln.

2. Primäres Vorhersagetool: Verbreitungsmodelle

Ausmaß und Richtung der im Zuge des Klimawandels zu erwartenden Veränderung von Verbreitungsgebieten lassen sich durch Verbreitungsmodelle prognostizieren (PEARSON & DAWSON, 2003; ELITH et al., 2011; MEROW et al., 2013). Diese Modelle werden mit aktuellen Verbreitungs- und Klimadaten kalibriert und anschließend auf absehbare zukünftige Klimabedingungen projiziert. Wahrscheinliche Arealveränderungen können so identifiziert werden.

Beide vorgestellte Studien basieren auf diesem gut etablierten, in der biologischen Klimawandelforschung weitverbreiteten Prognoseansatz. Wie alle Modelle sind Verbreitungsmodelle jedoch stets ein vereinfachtes Abbild von komplexen ökologischen Zusammenhängen. Trotz hoher Modellgüte und Vorhersagekraft ergeben sich gewisse Unschärfen. Auch die einfließenden Klimavorhersagen sind mit bestimmten Annahmen und Unsicherheiten behaftet, die umso größer werden, je feinskaliger die Betrachtungsebene ist.

Wichtig für das weitere Verständnis: Beide Arbeiten modellieren im Kern Klimanischen, verfeinert durch topographische und hydrographische Landschaftsmerkmale und Landnutzungsvariablen. Die daraus berechnete Lebensraumeignung definiert das potenzielle Verbreitungsgebiet auf der Landschaftsebene (PEARSON & DAWSON, 2003; ELITH & LEATHWICK, 2009). Gewässerspezifische Stressoren oder biotische Interaktionen wirken in der Regel deutlich feinskaliger und schränken tatsächliche Vorkommen innerhalb der modellierten Landschaftsebene weiter ein (CLOSS et al., 2016). Die Prognosen dürfen daher nicht als punktgenaue, gewässerscharfe Vorhersagen verstanden werden. Sie bilden vielmehr grundlegende Verbreitungsmuster und klimabedingte Arealveränderungen für mögliche Zukunftsszenarien ab.

Die untersuchten Zukunftsszenarien umfassen neben sehr optimistischen und pessimistischen Szenarien als Leitplan-

ken der Klimazukunft auch bewusst Entwicklungspfade, die eine Erderwärmung zum Ende des Jahrhunderts von größer 2 °C abbilden, ohne dabei unrealistisch pessimistische Annahmen zu machen. Angesichts der ungenügenden Bemühungen der Weltgemeinschaft die Klimaerwärmung gemäß dem Übereinkommen von Paris zu begrenzen, wie zuletzt auf der 27. Weltklimakonferenz sichtbar wurde, müssen diese „middle-of-the-road“-Szenarien als zunehmend wahrscheinlich gelten (RAFTERY et al., 2017; HAUSFATHER & PETERS, 2020; SHERWOOD et al., 2020). Konkret wurden folgende Zukunftsszenarien berücksichtigt:

Fallstudie 1 - Arealveränderungen ausgewählter Fischarten in Südwestdeutschland

- RCP4.5: moderates Emissionsszenario mit begrenztem Klimaschutz, das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt.
- RCP8.5: worst-case Emissionsszenario ohne Klimaschutz, das Zwei-Grad-Ziel wird massiv überschritten.

Fallstudie 2 - Langfristige Wirksamkeit des Natura 2000-Schutzgebietsnetzes

- SSP126: geringes Emissionsszenario mit konsequentem Klimaschutz, das Zwei-Grad-Ziel wird eingehalten.
- SSP370: „weiter-so“ Szenario mit unzureichendem Klimaschutz, das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt.
- SSP585: worst-case Emissionsszenario ohne Klimaschutz, das Zwei-Grad-Ziel wird massiv überschritten.

Im Gegensatz zu vielen vorangegangenen Studien, kombinieren die hier vorgestellten Arbeiten für jedes Zukunftsszenario die Projektionen mehrerer globaler Klimamodelle (General Circulation Models, GCMs). Zum Teil bestehen große Varianzen in den Klimaprojektionen spezifischer GCMs und die Selektion einzelner GCMs für Verbreitungsstudien kann zu spürbaren Unterschieden in Artverbreitungsmodellen führen (GOBERVILLE et al., 2015). Beide Studien verwenden daher die volle Bandbreite verfügbarer GCMs. Dieser „multi-GCM“ Ansatz berücksichtigt die methodenbedingte Varianz einzelner GCMs und ermöglicht so möglichst robuste Vorhersagen zukünftiger Verbreitungstrends.

Methodische Unterschiede zwischen den Arbeiten bestehen vor allem im geographischen Bezugsraum und – daran gekoppelt – der horizontalen Auflösung der Verbreitungsmodelle. Zur Quantifizierung wahrscheinlicher Arealveränderungen ausgewählter Fischarten wurden hochauflösende Verbreitungsmodelle (Rastergrid mit 30 Winkelsekunden, d.h. etwa 1 x 1 km horizontaler Auflösung) mit Nachweisdaten aus Baden-Württemberg trainiert und anschließend auf die Landesfläche projiziert. Die langfristige Wirksamkeit des Natura 2000-Schutzgebietsnetzes wurde dagegen für das Gebiet der gesamten Europäischen Union in einer Modellauflösung von 10 x 10 km analysiert, basierend auf dem

UTM-Gitter der europaweiten FFH-Monitoringdaten. Auch die betrachteten zukünftigen Zeiträume variieren leicht zwischen den Studien. Für die Analyse wahrscheinlicher Arealveränderungen in Baden-Württemberg wurden die Perioden 2041–2060 (nahe Zukunft) und 2061–2080 (ferne Zukunft) betrachtet, während für die Untersuchung der langfristigen Wirksamkeit des Natura 2000-Schutzgebietsnetzes Klimaprojektionen für die Periode 2071-2100 (Ende des Jahrhunderts) verwendet wurden.

2.1. Fallstudie 1: Klimaverlierer und –gewinner im Südwesten

Die Gewässerlandschaft Baden-Württembergs ist aufgrund der abwechslungsreichen Geomorphologie sehr vielfältig und artenreich. Ein Großteil des Fließgewässernetzes entfällt auf sommerkühle, rhithral geprägte Bäche und kleine Flüsse in Mittelgebirgslagen. In den Flussniederungen schließen sich sommerwarme, potamale Lebensräume an. Das heimische Fischarteninventar umfasst ca. 56 Arten, mit wesentlichen Anteilen der Rhein- und Donaufischfauna.

Basen et al. (2022b) untersuchten klimabedingte Arealveränderungen für sechs ausgewählte Fischarten mit unterschiedlichen ökologischen Anforderungen und Lebensraumpräferenzen entlang des Fließgewässerkontinuums: Bachforelle (*Salmo trutta*), Äsche (*Thymallus thymallus*), Bachschmerle (*Barbatula barbatula*), Flussbarsch (*Perca fluviatilis*), Rotauge (*Rutilus rutilus*) und Wels (*Silurus glanis*). Für jede dieser Fischarten wurde das potenzielle Kernverbreitungsgebiet unter gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen modelliert. Anschließend wurde der Anteil geeigneter Lebensräume an der Landesfläche basierend auf einem ~1 x 1 km Raster zwischen den drei Betrachtungszeiträumen (Gegenwart, nahe und ferne Zukunft) und zwei Zukunftsszenarien (RCP4.5 und RCP8.5, siehe oben) verglichen.

Für vier der sechs untersuchten Fischarten ist eine signifikante Veränderung des Verbreitungsgebiets unter zukünftigen Klimabedingungen wahrscheinlich (Abbildung 1). Gut geeignete Lebensräume für die Bachforelle werden in der fernen Zukunft (2070) um 78 (RCP4.5) bis 83 % (RCP8.5) abnehmen. Dieser Negativtrend wird bereits in naher Zukunft,

Fischartenschutz

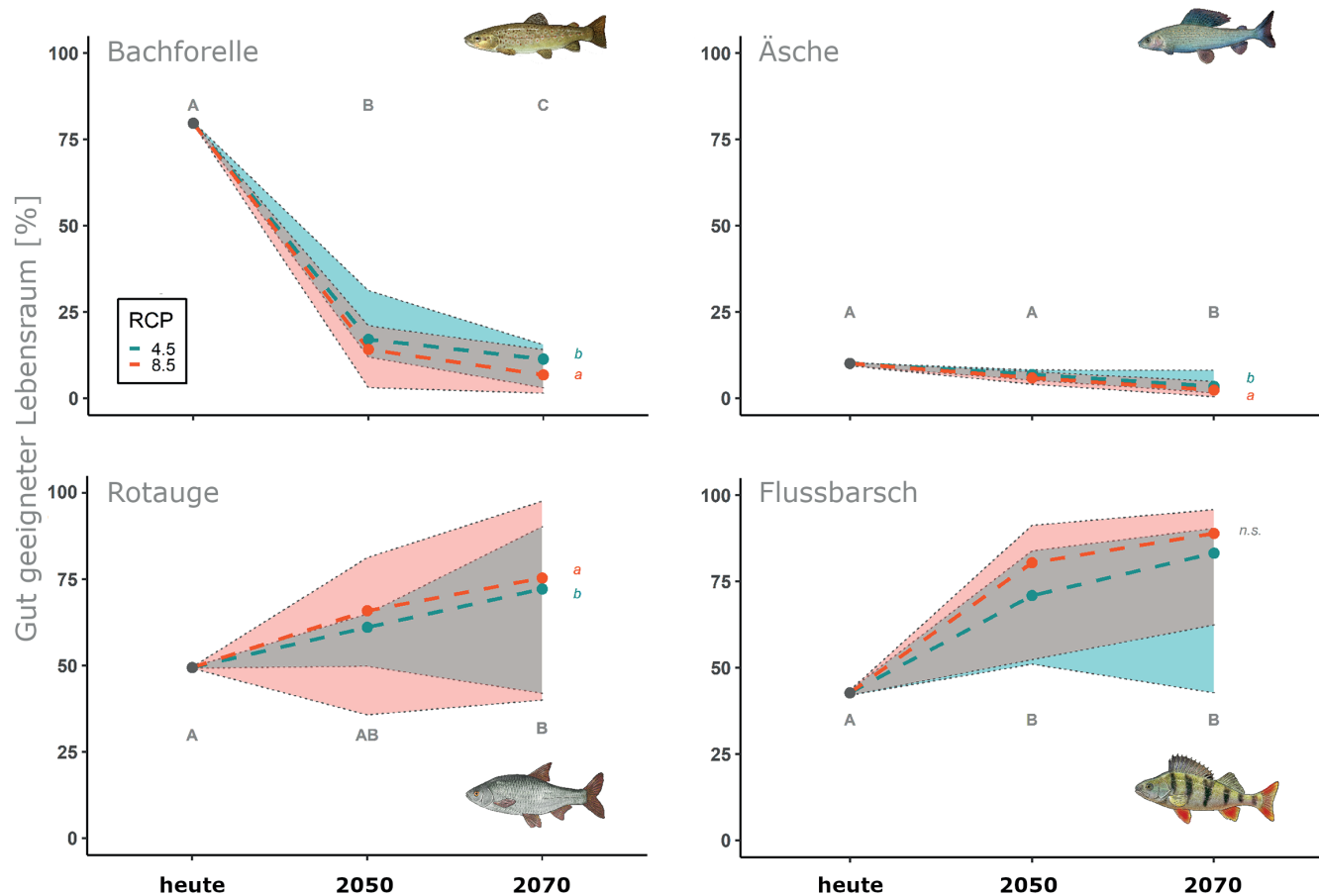


Abbildung 1

Anteil gut geeigneter Fischlebensräume an der Landesfläche Baden-Württembergs basierend auf einem ca. 1 x 1 km Raster unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen. Große Buchstaben geben das Signifikanzniveau für den Betrachtungszeitraum (Gegenwart, nahe und ferne Zukunft) und kleine Buchstaben das Signifikanzniveau für das Zukunftsszenario (RCP4.5 vs. RCP8.5) wieder, wobei verschiedene Buchstaben signifikante Unterschiede bedeuten (One-Way ANOVA mit Tukey HSD). Grafik modifiziert aus BASEN et al. (2022b).

d. h. Mitte des Jahrhunderts, deutlich spürbar sein. Für die Äsche wird ein Lebensraumrückgang von 33 (RCP4.5) bis 41 % (RCP8.5) prognostiziert. Gut geeignete Lebensräume für Rotaugen und Flussbarsch werden im Gegenzug deutlich zunehmen und sich möglicherweise sogar verdoppeln (Flussbarsch). Auch für den Wels zeigen die meisten Klimamodelle eine erwartbare Zunahme gut geeigneter Lebensräume.

Die vorhergesagten Arealveränderungen setzen sich aus drei Komponenten zusammen: Verlustgebiete, die gegenwärtig geeignet sind aber in Zukunft nicht mehr besiedelbar sein werden; Gewinngebiete, die gegenwärtig nicht geeignet sind, aber in Zukunft Lebensraum bieten und stabile Lebensräume, die auch in Zukunft noch geeignet sein werden. Für die Bachforelle werden bspw. Arealgewinne in höheren Lagen prognostiziert, die aber die weitverbreiteten Lebensraumverluste in geringeren Höhenlagen nicht ansatzweise kompensieren können. In der Summe verlagern sich gut geeignete Forellenlebensräume in größere Höhen und nehmen insgesamt stark ab. Für Flussbarsch und Wels sind ebenfalls Zugewinne vor allem in den mittleren Höhenlagen zu erwarten. Halten sich Verlust- und Gewinngebiete in etwa die Waage, kommt es zu einer geographischen Verlagerung gut geeigneter Lebensräume, ohne dass sich die Flächenbilanz über die Zeit ändert. Dieser Fall wird für die Bachschmerle vorhergesagt, deren gut geeignete Lebensräume sich geographisch verschieben, ohne dabei eine signifikante Änderung des Gesamtareals zu erfahren.

2.2. Fallstudie 2: Langfristige Wirksamkeit von Schutzgebieten

Schutzgebiete sind ein effizientes, wenngleich wenig genutztes Werkzeug zum Schutz von Fischlebensräumen. Obligatorisch ist der Arterhalt in Schutzgebieten für FFH-Arten des Anhangs II. Fische und Neunaugen nehmen in diesem Anhang eine herausragende Stellung ein und sind die zahlenmäßig größte Wirbeltiergruppe, die darin berücksichtigt wird (Anmerkung: Vögel werden dabei nicht einbezogen, da ihr Schutz in der Vogelschutzrichtlinie extra geregelt wird). Die FFH-Richtlinie ist somit bei wirkungsvoller Anwendung geeignet, einen wesentlichen Betrag zum Fischartenschutz zu leisten.

Klimabedingte Areal- und Lebensraumveränderungen gefährden jedoch die langfristige Wirksamkeit der gegenwärtigen Schutzgebietskulisse. Basen et al. (2022a) quantifizierten diese Gefahr erstmals für alle Anhang II-Fischarten, die in Deutschland vorkommen und dauerhaft im Süßwasser leben. Anhand von europaweiten FFH-Monitoringdaten wurden die Umweltnischen von 18 Fisch-, 2 Neunaugen-, 2 Flusskrebs- und 2 Großmuschelarten modelliert und auf drei Zukunftsszenarien projiziert (SSP126, SSP370 und SSP585). Aus den Verbreitungsmodellen wurde anschließend die Lebensraumeignung der ausgewiesenen FFH-Gebiete für jedes Klimaszenario berechnet und verglichen (Abbildung 2).

Die Anzahl ausgewiesener FFH-Gebiete reicht dabei von 5 für die Seelaube (*Alburnus mento*) bis jeweils über 1.000 für Groppe (*Cottus gobio*), Bitterling (*Rhodeus amarus*) und Bachneunauge (*Lampetra planeri*).

Für die meisten der untersuchten Fischarten zeigen die Verbreitungsmodelle einen Trend zu Arealverschiebungen in nordöstlicher Richtung und/oder größere Höhenlagen (Abbildung 2). Gegenwärtig ausgewiesene FFH-Gebiete verlieren dadurch an Lebensraumeignung oder fallen vollständig aus dem vorhergesagten Kernverbreitungsgebiet heraus.

Während die berechnete Lebensraumeignung der ausgewiesenen FFH-Gebiete unter gegenwärtigen Klimabedingungen durchweg hoch ist, nimmt sie für zwei Drittel der untersuchten FFH-Arten bis zum Ende des Jahrhunderts folgerichtig stark ab. Der Rückgang der Schutzgebietseignung korreliert dabei mit dem Ausmaß der Klimaveränderung. In einer SSP370 oder SSP585 Klimazukunft werden ein Drittel bis über die Hälfte der FFH-Arten bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als drei Viertel der derzeit ausgewiesenen FFH-Gebiete als gut geeigneten Lebensraum verlieren (Abbildung 3). Hält die Weltgemeinschaft das Zwei-Grad-Ziel ein (SSP126), wird dies zwar noch spürbare, in der Summe aber deutlich weniger folgenschwere, Auswirkungen haben. Zu den Arten mit starken prognostizierten Rückgängen an gut geeigneten FFH-Gebieten zählen unter anderem Flussperle (*Margaritifera margaritifera*) und Bachmuschel (*Unio crassus*), Steinkrebs (*Austropotamobius torrentium*), Donau- (*Eudontomyzon vladykovi*) und Bachneunauge, Groppe, Huchen (*Hucho hucho*), Stromgründling (*Romanogobio belingii*), Steinbeißer (*Cobitis taenia*) und Schlammpeitzger (*Misgurnus fossilis*) sowie verschiedene Donau-Endemiten.

3. Synthese und fachliche Einordnung

In der Zusammenschau zeigen die beiden Arbeiten in Übereinstimmung mit verwandten Studien vier wichtige Aspekte:

1. Die Klimakrise führt zu teilweise dramatischen Arealveränderungen von Fischarten, sowohl in regionalem (BASEN et al., 2022b) wie kontinentalem Maßstab (BASEN et al., 2022a). Die Verbreitungsgebiete von Süßwasserfischen sind dabei längst in Bewegung (HICKLING et al., 2006; MAIRE et al., 2019) und verschieben sich vielfach nach Nordosten und in größere Höhenlagen (HEINO et al., 2009; MARKOVIC et al., 2014; BASEN et al., 2022a).
2. Die Artengemeinschaften entlang des Fließgewässerkontinuums reagieren verschieden (BUISSON et al., 2008; WALTERS et al., 2018; BASEN et al., 2022b): Salmoniden-geprägte Zönosen der Gewässeroberläufe sind sensitiver gegenüber Klimaveränderungen und enthalten mehrheitlich „Klimaverlierer“, während die Cyprin-

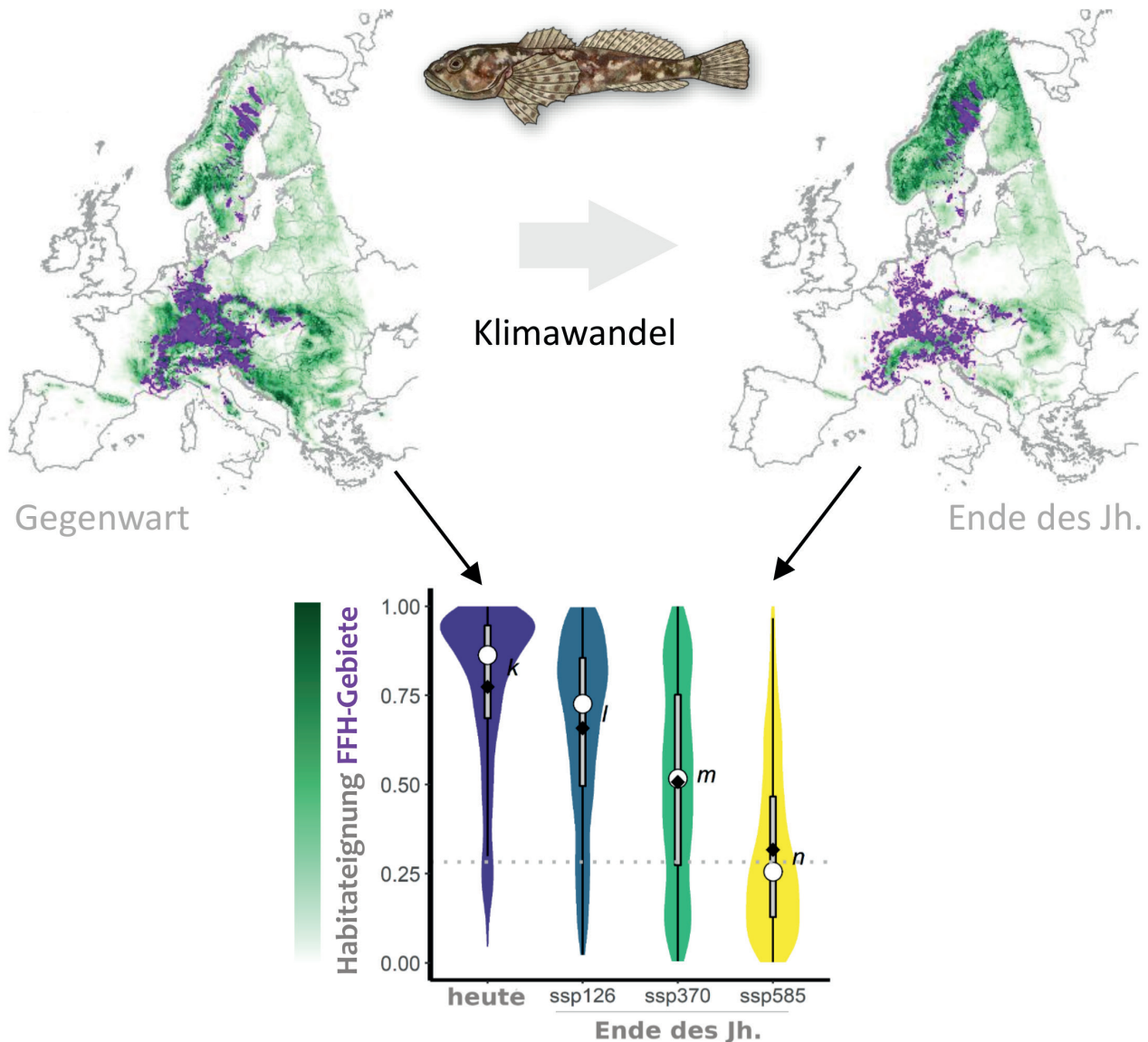


Abbildung 2

Evaluierung der langfristigen Wirksamkeit von FFH-Schutzgebieten am Beispiel der Groppe (*Cottus gobio sensu stricto*): Mithilfe europaweiter Art-nachweise (10 x 10 km Raster) wurde ein Verbreitungsmodell kalibriert (grüner Farbgradient von 0 = ungeeignet bis 1 = sehr gut geeignet) und auf gegenwärtige (links oben) und zukünftige Klimabedingungen projiziert (bspw. SSP585, rechts oben). Anschließend wurde die Lebensraumeignung der für die Groppe ausgewiesenen FFH-Gebiete (violette Flächen, N = 1.167) berechnet und zwischen den Klimaszenarien verglichen (Violin- und Boxplots in der Grafik unten). Buchstaben in der Grafik geben das Signifikanzniveau an (gemischtes lineares Modell mit biogeographischer Region als Kofaktor und FFH-Gebiet als Zufallsfaktor, gefolgt von einem Tukey post-hoc Test). Die gestrichelte horizontale Linie zeigt den Schwellenwert für gut geeignete Lebensräume. Liegt die Lebensraumeignung eines FFH-Gebiets unter diesem Wert, ist es für die Groppe kaum geeignet. Abbildung verändert aus BASEN et al. (2022a).

den-dominierten Gemeinschaften der nachfolgenden Gewässerregionen tendenziell widerstandsfähiger sind und zunehmend eurytherme „Klimagewinner“ umfassen (BASEN et al., 2022b). Weitverbreitete, dominante Arten der Oberläufe gehen in der Folge stark zurück, während in den Mittel- und Unterläufen eine Homogenisierung der Fischfauna einsetzt.

- Das Ausmaß beobachteter und vorhergesagten Arealveränderungen korreliert mit der Stärke der Klima-

veränderung (CHEN et al., 2011; BASEN et al., 2022b, 2022a). Gegenwärtig steht die Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels auf der Kippe, weshalb die Prognosen für die RCP4.5 und SSP370 Pfade bittere Realität werden könnten. Unter diesen Emissionspfaden wird eine Leitart vieler Gewässer, die Bachforelle, bis ca. 2070 bspw. rund 80 % ihres gut geeigneten Verbreitungsareals in Baden-Württemberg einbüßen. Für die Äsche wird etwa ein Drittel des gegenwärtigen Lebensraums wegfallen (BASEN et al., 2022b).

4. Klimabedingte Arealveränderungen führen zu einer Diskrepanz zwischen gegenwärtigen Schutzgebieten und zukünftig gut geeigneten Fischlebensräumen (BASEN et al., 2022a). Die langfristige Wirksamkeit der Schutzgebiete wird dadurch untergraben. Dieser Effekt war zu vermuten, neu ist aber die Qualität und Quantität dieses Risikos für die FFH-Fischfauna, insbesondere unter realistischen Zukunftsannahmen (SSP370) (BASEN et al., 2022a).

Anders als landlebende oder nur zeitweilig im Wasser lebende Artengruppen haben hololimnische Taxa, d.h. Arten die ihren gesamten Lebenszyklus im Süßwasser verbringen, nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten ihrer Klimanische zu folgen und in neu geeignete Lebensräume oder Schutzgebiete einzuwandern (BASEN et al., 2022a und Zitate darin). Inhärente Ausbreitungshindernisse wie Wasserscheiden und Einzugsgebietsgrenzen, starke Habitat- und biotische Widerstände sowie die massive anthropogene Zerschneidung stellen starke Ausbreitungslimitierungen dar. Potenzielle Zugewinne an klimatisch geeigneten Lebensräumen können so nicht oder nur teilweise realisiert werden, während klimabedingte Lebensraumverluste unmittelbar wirken (BASEN et al., 2022b). Zudem besteht ein hohes Risiko, dass die Geschwindigkeit des Klimawandels die Ausbreitungsrate aquatischer Arten schlicht übersteigt (KAPPES & HAASE, 2012; WOOLWAY & MABERLY, 2020).

Geraten die Verbreitungsareale in Bewegung, werden sich neue, mitunter auch instabile und nur vorübergehende Artengemeinschaften ausbilden (SCHIPPERS et al., 2021). Dies stellt u.a. die Umweltüberwachung und -bewertung, bspw. im Zuge der WRRRL oder FFH-RL, vor gewaltige Herausforderungen. Denn Referenzzustände und Zielvorgaben sind

oftmals an Leitbilder geknüpft, die von historischen Verbreitungen und Bestandssituationen abgeleitet wurden, angesichts der Klimakrise aber kaum mehr zu erreichen sein werden. Bereits heute ist es eine schwierige Aufgabe in der fischereiwissenschaftlichen Praxis, klimabedingte Bestandsveränderungen von den Effekten anderer Stressoren zu unterscheiden (bspw. DEWEBER et al., 2022).

Zuletzt braucht es nicht viel Phantasie, um zur Erkenntnis zu gelangen, dass die Umbrüche in der Fischfauna unweigerlich auf die Fischerei durchschlagen werden. Zwar hat besonders die Freizeitfischerei ein vergleichsweise hohes Anpassungspotenzial, das aber nicht über die beträchtlichen Klimarisiken hinwegtäuschen darf: Was bleibt bspw. vom „Forellenland“ Baden-Württemberg, wenn Salmonidenbestände durch die Klimakrise verbreitet erodieren? Kann die zunehmende Ausbreitung von Generalisten wie Flussbarsch und Wels die Folgen für die Fischerei abfedern? Wie werden sich beständig verändernde Produktionsbedingungen auf die Aquakultur auswirken? Der Ausgang dieses sozioökonomischen Großexperiments ist ungewiss.

5. Was machen wir daraus?

Fische haben grundsätzlich vier Möglichkeiten auf die Klimakrise zu reagieren: i) ihrer Klimanische folgen („move“), ii) an die neuen Klimabedingungen anpassen („adapt“), iii) in lokalen Klimarefugien überdauern („persist“) oder iv) Aussterben („die“). Vorausschauendes Fischerei- und Artenschutzmanagement sollte selbstverständlich darauf abzielen, die Realisierung der ersten drei Möglichkeiten ma-

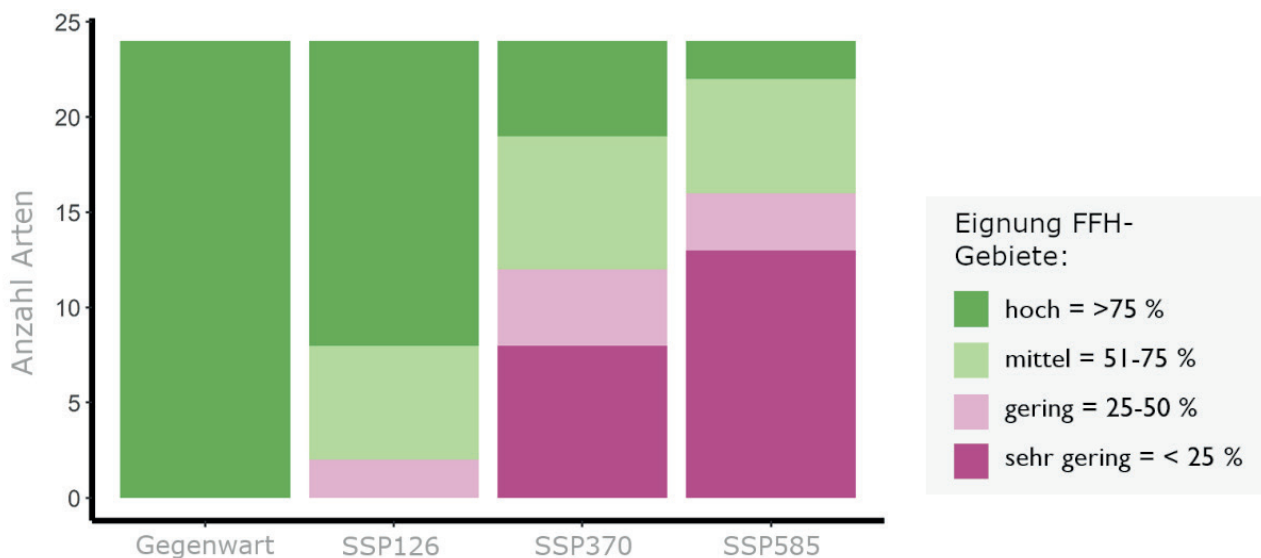


Abbildung 3

Abdeckung der Lebensraumeignung (Kernverbreitungsareal) durch ausgewiesene FFH-Gebiete für die 24 untersuchten FFH-Arten in Abhängigkeit vom Klimaszenario (Gegenwart und prognostizierte Bedingungen zum Ende des Jahrhunderts für SSP126-SSP585). Eine Art ist als „grün“ klassifiziert, wenn mehr als Dreiviertel der ausgewiesenen FFH-Gebiete innerhalb des potenziellen Kernverbreitungsareals liegen. Entfallen weniger als ein Viertel der ausgewiesenen FFH-Gebiete auf gut geeignete Lebensräume wird die Art entsprechend „violett“ markiert. Abbildung verändert aus BASEN et al. (2022a).

ximal zu unterstützen, um die schlimmsten Klimafolgen für die Fischerei abzuwenden. Hierzu sind u.a. folgende Anpassungsmaßnahmen geeignet (das Ziel ist jeweils in Klammern genannt):

- Erhaltung und Förderung der natürlichen Klimaresilienz der Gewässerlebensräume („persist“)

In natürlichen und weitestgehend vom Menschen unbeeinflussten Gewässerlebensräumen zeigen sich bislang die geringsten negativen Auswirkungen des Klimawandels. Diese Gewässerabschnitte gilt es zu schützen und neue renaturierte Abschnitte zu fördern (JUSTICE et al., 2017; O'BRIAIN et al., 2020; BASEN et al., 2022c und Zitate darin). Neben In-stream-Maßnahmen kommt dabei auch den Gewässerrandstreifen eine Schlüsselrolle zu: Standortgerechte, natürliche Ufergehölze fördern ein kühles Mikroklima, schaffen Strukturvielfalt, sichern die Ufer und halten übermäßige Nährstoff- und Sedimenteinträge zurück (DUGDALE et al., 2018; FELD et al., 2018). Auch die Reaktivierung und Wiederanbindung der Flussauen fördert die Klimaresilienz durch Erhöhung der Lebensraumvielfalt und Wasserrückhalt (EBERT et al., 2009; STOFFERS et al., 2022). Zuletzt sind naturnahe, klimaresiliente Gewässerstrecken effektive Ausbreitungskorridore für viele Arten (siehe nächster Punkt, „move“).

- (Wieder-)Herstellung der longitudinalen und lateralen Durchgängigkeit („move“ & „persist“)

Die Wiedervernetzung aquatischer Lebensräume ist ein wesentliches Anliegen im Fischschutz, das durch die Klimakrise nochmals deutlich an Gewicht gewinnt (RADINGER et al., 2018; TICKNER et al., 2020; BASEN et al., 2022c). Wo möglich, sollten Querbauwerke komplett rückgebaut werden, um neben der vollständigen Durchgängigkeit auch die ursprüngliche Hydromorphologie der Gewässer wiederherzustellen (VOLPATO et al., 2009; GOUSKOV et al., 2016; BRINKER et al., 2018). Mindestens sind aber funktionale Anlagen sowohl für den Fischauf- als auch -abstieg anzulegen (BRINKER et al., 2018; OHMS et al., 2022). Auch die Schaffung von Niedrigwasserrinnen und die funktionale Wiederanbindung kleinerer Zuflüsse sind essentiell. Durch die Vernetzung der Gewässerlebensräume werden kurzfristige Ausweichbewegungen zu lokalen Kältereferugien oder strömungsgeschützten Bereichen ermöglicht, um dort akute Hitze- und Dürreperioden oder extreme Hochwasser zu überdauern (VAN LOOY et al., 2019; WHITE et al., 2019). Langfristig sind vernetzte Lebensräume die wichtigste Voraussetzung für Fischarten ihrer Klimanische folgen zu können und neu geeignete Lebensräume zu erschließen. Dies gilt auch für Arten mit normalerweise geringem Migrationsbedarf wie Groppe, Steinbeißer oder Stromgründling, die gegenwärtig nicht im Fokus der Bemühungen zur Wiedervernetzung aquatischer Lebensräume stehen (RADINGER et al., 2018; CAROSI et al., 2019).

- Gezielte (Wieder-)Ansiedlung („move“)

Wenn neu entstandene geeignete Lebensräume oder Klimarefugien durch unüberwindbare Ausbreitungshindernisse für die Zielarten auf natürliche Weise nicht erreichbar sind, können sie durch gezielte (Wieder-)Ansiedlung nutzbar gemacht werden (GALLAGHER et al., 2015; BUTT et al., 2021). Der (neu) geeignete Lebensraum kann dabei innerhalb aber auch außerhalb der historischen Verbreitungsgrenzen liegen. Bei dieser sogenannten „assistierten Migration“ müssen jedoch die möglichen Risiken der Einführung der Art für das jeweilige Ökosystem sorgfältig abgewogen werden, insbesondere, wenn dieses außerhalb des historischen Verbreitungsareals liegt (RICCIARDI & SIMBERLOFF, 2009; BRODIE et al., 2021; KRACKE et al., 2021).

- Identifizierung und Unterschutzstellung von Klimarefugien („persist“)

Klimarefugien erlauben das lokale oder regionale Überdauern einer Fischart in Gegenwart des Klimawandels und können so den Fortbestand der Art in einem bestimmten Gebiet sichern (FRECHETTE et al., 2018; WHITE et al., 2019). Potenzielle Klimarefugien sollten daher gezielt gesucht und vorausschauend geschützt werden (KURYLYK et al., 2015; OUELLET et al., 2020). Artverbreitungsmodelle können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten (GUISAN et al., 2013; CHUCHOLL 2017). Indem Klimarefugien das vollständige klimabedingte Verschwinden einer Art verhindern oder zumindest verzögern, fördern sie indirekt möglicherweise auch die evolutionäre Anpassung an die außerhalb der Refugien vorherrschenden neuen klimatischen Verhältnisse (siehe nächster Punkt, „adapt“).

- Erhalt und Förderung der innerartlichen genetischen Vielfalt („adapt“)

Evolutionäre Anpassungen können die Auswirkungen der Klimakrise innerhalb gewisser Grenzen abmildern (DE MEESTER et al., 2018). Um dieses natürliche Anpassungspotential zu maximieren, ist der Erhalt einer möglichst großen genetischen Vielfalt der jeweiligen Arten wichtig. Angestammte, lokale Standortformen mit gewässerspezifischen Anpassungen sind vorrangig zu schützen, was insbesondere bei der Planung von Besatz- oder Wiederansiedlungsmaßnahmen zu beachten ist. Das evolutionäre Anpassungspotenzial ist jedoch begrenzt, auch hinsichtlich der nötigen Schnelle, und Anpassungen an bspw. höhere Temperaturen gehen möglicherweise zu Kosten anderer, essenzieller Arteigenschaften. Paläontologische Daten geben zudem kaum Hinweise auf entscheidende evolutionäre Anpassungen in Reaktion auf zurückliegende, deutlich langsamere Klimaveränderungen (PARMESAN, 2006 und Zitate darin). Vorhandene Arten folgten vielmehr ihrer Klimanische durch Arealveränderungen („move“).

6. Wind Of Change – auch in Fischerei und Artenschutz

Mit der Initiierung einer „Zukunftskommission Fischerei“ will die Bundesregierung einen wichtigen und notwendigen Schritt in Richtung nachhaltiger Fischerei und Aquakultur gehen. Angesichts der massiven Klimarisiken für die Fischfauna sollte diese Initiative auch Anlass für ein grundsätzliches Neudenken der zukünftigen fischereilichen Rahmenbedingungen und des fischereilichen Handelns im Hinblick auf eine vorausschauende Klimaanpassung sein (vgl. BASEN et al., 2022c). Mehr noch: auch im Fischartenschutz müssen neue Wege beschritten werden, um die Folgen der Klimakrise abzumildern.

Zielvorgaben und Referenzzustände für die Gewässerüberwachung und den Artenschutz sowie die Schutzgebietskulisse werden bspw. einer regelmäßigen Neubewertung bedürfen. Im Detail sind dabei freilich viele Fragen offen, die aber bereits jetzt gestellt werden müssen: Wie sind klimabedingte Rückgänge von Leitarten zu bewerten? Wie geht man mit neuen, möglicherweise instabilen Fischgemeinschaften um, die keine historische Entsprechung haben? Wie ist die erwartete Angleichung der Fischgemeinschaften in den Mittel- und Unterläufen einzuordnen? Wie sind Referenzwerte für den günstigen Erhaltungszustand von FFH-Arten zu definieren, wenn die historischen Verhältnisse klimawandelbedingt obsolet werden? Wie kann der absehbare Verlust an

geeigneten Schutzgebieten kompensiert werden – gezielte Schaffung von aquatischen Wanderkorridoren, Neuausweisung in Klimarefugien, „Assisted Migration“?

Auch die gute fischereiliche Praxis muss in Teilen neu gedacht werden: Sollte man bspw. einen Besatz mit wärmetoleranten Stämmen sensitiver Fischarten wie der Bachforelle erwägen, wenn angestammte Populationen absehbar oder real verschwinden? Wäre eine mögliche Antwort auf klimawandelbegünstigte Fischkrankheiten wie PKD ein Besatz mit immunisierten Fischen (ROS et al., 2023)? Ist Kompensationsbesatz zur Stützung klimageschädigter Fischbestände sinnvoll – und wenn ja, für wie lange, oder wird damit die natürliche Anpassungsfähigkeit gefährdet? Ist im Verlustfall eine Bewirtschaftung mit nicht-heimischen, ökologisch vergleichbaren aber toleranteren Arten (bspw. Bachforelle vs. Regenbogenforelle) ein letzter Ausweg?

Eine offene Diskussion und Auseinandersetzung mit diesen Themen ist unerlässlich und jetzt notwendig. Aus fachlicher Sicht ist eine vorausschauende und dynamische Anpassung anzustreben, die auch unumkehrbare klimabedingte Veränderungen im Artenbestand berücksichtigt. Dabei können, wie hier vorgestellt, die Vorhersagen von Verbreitungsmodellen entscheidende Impulse geben. Denn im Grunde wissen wir, was kommt.

Literaturverzeichnis

- Basen, T., Chucholl, C., Oexle, S., Ros, A., Brinker, A. (2022a): Suitability of Natura 2000 sites for threatened freshwater species under projected climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 32: 1872–1887. <https://doi.org/10.1002/aqc.3899>
- Basen, T., Ros, A., Chucholl, C., Oexle, S., Brinker, A. (2022b): Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany. *PLOS Climate* 1: e0000006. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000006>
- Basen, T., Chucholl, C., Brinker, A. (2022c). Auf schmalem Grad° - Die Zukunft unserer Fische in der Klimakrise. Analysen, Vorhersagen, Handlungsmöglichkeiten. Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Brinker, A., Chucholl, C., Behrmann-Godel, J., Matzinger, M., Basen, T., Baer, J. (2018): River damming drives population fragmentation and habitat loss of the threatened Danube streber (Zingel streber): Implications for conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 28: 587–599. <https://doi.org/10.1002/aqc.2878>
- Brodie, J.F., Lieberman, S., Moehrensclager, A., Redford, K.H., Rodríguez, J.P., Schwartz, M., Seddon, P.J., Watson, J.E.M. (2021): Global policy for assisted colonization of species. *Science* 372: 456–458. <https://doi.org/10.1126/science.abg0532>
- Buisson, L., Thuiller, W., Lek, S., Lim, P., Grenouillet, G. (2008): Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology* 14: 2232–2248.
- Butt, N., Chauvenet, A.L.M., Adams, V.M., Beger, M., Gallagher, R.V., Shanahan, D.F., Ward, M., Watson, J.E.M., Possingham, H.P. (2021): Importance of species translocations under rapid climate change. *Conservation Biology* 35: 775–783. <https://doi.org/10.1111/cobi.13643>
- Carosi, A., Padula, R., Ghetti, L., Lorenzoni, M. (2019): Endemic Freshwater Fish Range Shifts Related to Global Climate Changes: A Long-Term Study Provides Some Observational Evidence for the Mediterranean Area. *Water* 11: 2349. <https://doi.org/10.3390/w11112349>
- Chen, I.-C., Hill, J.K., Ohlemüller, R., Roy, D.B., Thomas, C.D. (2011): Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science* 333: 1024–1026.
- Chucholl, C. (2017): Niche-based species distribution models and conservation planning for endangered freshwater crayfish in south-western Germany. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27: 698–705. <https://doi.org/10.1002/aqc.2734>

- Closs, G.P., Angermeier, P.L., Darwall, W.R.T., Balcome, S.R. (2016): Why are freshwater fish so threatened? In: Gloss, P., Krkrosek, M., Olden, J.D. (Hrsg.), Conservation of freshwater fishes. Cambridge University Press, Cambridge, 37-75. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139627085.003>
- Cockrem, J.F. (2022): Individual variation, personality, and the ability of animals to cope with climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution* 10: 897314. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.897314>
- Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M., Grenouillet, G. (2013): Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology* 58: 625–639. <https://doi.org/10.1111/fwb.12081>
- Comte, L., Olden, J.D. (2017): Climatic vulnerability of the world's freshwater and marine fishes. *Nature Climate Change* 7: 718–722. <https://doi.org/10.1038/nclimate3382>
- Daufresne, M., Lengfellner, K., Sommer, U. (2009): Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 12788–12793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902080106>
- De Meester, L., Stoks, R., Brans, K.I. (2018): Genetic adaptation as a biological buffer against climate change: Potential and limitations. *Integrative Zoology* 13: 372–391. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12298>
- DeWeber, J.T., Baer, J., Rösch, R., Brinker, A. (2022): Turning summer into winter: nutrient dynamics, temperature, density dependence and invasive species drive bioenergetic processes and growth of a keystone coldwater fish. *Oikos* 2022: e09316. <https://doi.org/10.1111/oik.09316>
- Dugdale, S.J., Malcolm, I.A., Kantola, K., Hannah, D.M. (2018): Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of The Total Environment* 610–611: 1375–1389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.198>
- Ebert, S., Hulea, O., Strobel, D. (2009): Floodplain restoration along the lower Danube: A climate change adaptation case study. *Climate and Development* 1: 212–219. <https://doi.org/10.3763/cdev.2009.0022>
- Elith, J., Leathwick, J.R. (2009): Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J. (2011): A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Goberville, E., Beaugrand, G., Hautekète, N.-C., Piquot, Y., Luczak, C. (2015): Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models. *Ecology and Evolution* 5: 1100–1116. <https://doi.org/10.1002/ece3.1411>
- Feld, C., Fernandes, M.R., Ferreira, M., Hering, D., Ormerod, S., Venohr, M., Gutiérrez-Cánovas, T. (2018): Evaluating riparian solutions to multiple stressor problems in river ecosystems — A conceptual study. *Water Research* 139: 381-394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.014>
- Frechette, D.M., Dugdale, S.J., Dodson, J.J., Bergeron, N.E. (2018): Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 75: 1999–2010. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0422>
- Gallagher, R.V., Makinson, R.O., Hogbin, P.M., Hancock, N. (2015): Assisted colonization as a climate change adaptation tool. *Austral Ecology* 40: 12–20. <https://doi.org/10.1111/aec.12163>
- Gousskov, A., Reyes, M., Wirthner-Bitterlin, L., Vorbürger, C. (2016): Fish population genetic structure shaped by hydroelectric power plants in the upper Rhine catchment. *Evolutionary Applications* 9: 394–408. <https://doi.org/10.1111/eva.12339>
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J.B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P.R., Tulloch, A.I.T., Regan, T.J., Brotons, L., McDonald-Madden, E., Mantyka-Pringle, C., Martin, T.G., Rhodes, J.R., Maggini, R., Setterfield, S.A., Elith, J., Schwartz, M.W., Wintle, B.A., Broennimann, O., Austin, M., Ferrier, S., Kearney, M.R., Possingham, H.P., Buckley, Y.M. (2013): Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters* 16: 1424–1435. <https://doi.org/10.1111/ele.12189>
- Hausfather, Z., Peters, G.P. (2020): Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* 577: 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Heino, J., Virkkala, R., Toivonen, H. (2009): Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews* 84: 39–54. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00060.x>
- Heino, J., Erkinaro, J., Huusko, A., Luoto, M. (2016): Climate change effects on freshwater fishes, conservation and management. In: Gloss, P., Krkrosek, M., Olden, J.D. (Hrsg.), Conservation of freshwater fishes. Cambridge University Press, Cambridge, 76-106. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139627085.004>
- Hickling, R., Roy, D.B., Hill, J.K., Fox, R., Thomas, C.D. (2006): The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology* 12: 450–455. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x>
- Isaak, D.J., Rieman, B.E. (2013): Stream isotherm shifts from climate change and implications for distributions of ectothermic organisms. *Global Change Biology* 19: 742–751. <https://doi.org/10.1111/gcb.12073>
- Justice, C., White, S.M., McCullough, D.A., Graves, D.S., Blanchard, M.R. (2017): Can stream and riparian restoration offset climate change impacts to salmon populations? *Journal of Environmental Manage-*

- ment 188: 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.005>
- Kappes, H., Haase, P. (2012): Slow, but steady: dispersal of freshwater molluscs. *Aquatic Sciences* 74: 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0187-6>
- Kracke, I., Essl, F., Zulka, K.P., Schindler, S. (2021): Risks and opportunities of assisted colonization: the perspectives of experts. *Nature Conservation* 45: 63–84. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.45.72554>
- Kemp, L., Xu, C., Depledge, J., Ebi, K.L., Gibbins, G., Kohler, T.A., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H.J., Steffen, W., Lenton, T.M. (2022): Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119: e2108146119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119>
- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T.B., Linnansaari, T., Cunjak, R.A., Curry, R.A. (2015): Preserving, augmenting, and creating cold-water thermal refugia in rivers: concepts derived from research on the Miramichi River, New Brunswick (Canada). *Ecohydrology* 8: 1095–1108. <https://doi.org/10.1002/eco.1566>
- Liu, P.R., Raftery, A.E. (2021): Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Communications Earth & Environment* 2: 29. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00097-8>
- Lyon, C., Saupe, E.E., Smith, C.J., Hill, D.J., Beckerman, A.P., Stringer, L.C., Marchant, R., McKay, J., Burke, A., O’Higgins, P., Dunhill, A.M., Allen, B.J., Riel-Salvatore, J., Aze, T. (2022): Climate change research and action must look beyond 2100. *Global Change Biology* 28: 349–361. <https://doi.org/10.1111/gcb.15871>
- Maire, A., Thierry, E., Viechtbauer, W., Daufresne, M. (2019): Poleward shift in large-river fish communities detected with a novel meta-analysis framework. *Freshwater Biology* 64: 1143–1156. <https://doi.org/10.1111/fwb.13291>
- Markovic, D., Carrizo, S., Freyhof, J., Cid, N., Lengyel, S., Scholz, M., Kasperdus, H., Darwall, W. (2014): Europe’s freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs. *Diversity and Distributions* 20: 1097–1107. <https://doi.org/10.1111/ddi.12232>
- Meinshausen, M., Nicholls, Z.R.J., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J.G., Daniel, J.S., John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S., Smith, S.J., van den Berg, M., Velders, G.J.M., Vollmer, M.K., Wang, R.H.J. (2020): The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development* 13: 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Merow, C., Smith, M.J., Silander, J.A. (2013): A practical guide to MaxEnt for modeling species’ distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- O’Briain, R., Shephard, S., Matson, R., Gordon, P., Kelly, F.L. (2020): The efficacy of riparian tree cover as a climate change adaptation tool is affected by hydromorphological alterations. *Hydrological Processes* 34: 2433–2449. <https://doi.org/10.1002/hyp.13739>
- Ohms, H.A., Chargualaf, D.N., Brooks, G., Hamilton, C., Palkovacs, E.P., Boughton, D.A. (2022): Poor downstream passage at a dam creates an ecological trap for migratory fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79: 2204–2215. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2022-0095>
- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S. (2020): River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of The Total Environment* 736: 139679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- Parmesan, C. (2006): Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pearson, R.G., Dawson, T.P. (2003): Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeography* 12: 361–371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>
- Radinger, J., Hölker, F., Horký, P., Slavík, O., Wolter, C. (2018): Improved river continuity facilitates fishes’ abilities to track future environmental changes. *Journal of Environmental Management* 208: 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.011>
- Raftery, A.E., Zimmer, A., Frierson, D.M.W., Startz, R., Liu, P. (2017): Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change* 7: 637–641. <https://doi.org/10.1038/nclimate3352>
- Ricciardi, A., Simberloff, D. (2009): Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology & Evolution* 24: 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.12.006>
- Ros, A., Baer, J., Brinker, A. (2023): Does treatment of brown trout with the parasite causing PKD increase stocking success and boost resilience against the disease? *Fisheries Management and Ecology* 33: 333–337. <https://doi.org/10.1111/fme.12626>
- Schippers, P., Abarca, E.L., Verboom, J., Wamelink, G.W.W., Vos, C.C., de Boer, W.F., Harvey, J.A., Essens, T., Grashof-Bokdam, C.J., WallisDeVries, M.F., Cobben, M.M.P. (2021): Biodiversity conservation in climate change driven transient communities. *Biodiversity and Conservation* 30: 2885–2906. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02241-4>
- Sherwood, S.C., Webb, M.J., Annan, J.D., Armour, K.C., Forster, P.M., Hargreaves, J.C., Hegerl, G., Klein, S.A., Marvel, K.D., Rohling, E.J., Watanabe, M., An-

- draws, T., Braconnot, P., Bretherton, C.S., Foster, G.L., Hausfather, Z., von der Heydt, A.S., Knutti, R., Mauritsen, T., Norris, J.R., Proistosescu, C., Rugenstein, M., Schmidt, G.A., Tokarska, K.B., Zelinka, M.D. (2020): An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence. *Reviews of Geophysics* 58: e2019RG000678. <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>
- Stoffers, T., Buijse, A.D., Geerling, G.W., Jans, L.H., Schoor, M.M., Poos, J.J., Verreth, J.A.J., Nagelkerke, L.A.J. (2022): Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales. *Science of The Total Environment* 838: 156509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156509>
- Tickner, D., Opperman, J.J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Cooke, S.J., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G., Harrison, I., Hughes, K., Jones, T., Leclère, D., Lynch, A.J., Leonard, P., McClain, M.E., Muruven, D., Olden, J.D., Ormerod, S.J., Robinson, J., Tharme, R.E., Thieme, M., Tockner, K., Wright, M., Young, L. (2020): Bending the Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan. *BioScience* 70: 330–342. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa002>
- Van Looy, K., Tonkin, J.D., Floury, M., Leigh, C., Soininen, J., Larsen, S., Heino, J., Poff, N.L., DeLong, M., Jähnig, S.C., Datry, T., Bonada, N., Rosebery, J., Jamoneau, A., Ormerod, S.J., Collier, K.J., Wolter, C. (2019): The three Rs of river ecosystem resilience: Resources, recruitment, and refugia. *River Research and Applications* 35: 107–120. <https://doi.org/10.1002/rra.3396>
- Volpato, G., Barreto, R., Marcondes, A., Moreira, P., Ferreira, M. (2009): Fish ladders select fish traits on migration—still a growing problem for natural fish populations. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* 42: 307–313. <https://doi.org/10.1080/10236240903299177>
- Walters, A.W., Mandeville, C.P., Rahel, F.J. (2018): The interaction of exposure and warming tolerance determines fish species vulnerability to warming stream temperatures. *Biology Letters* 14: 20180342. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0342>
- White, S.L., Kline, B.C., Hitt, N.P., Wagner, T. (2019): Individual behaviour and resource use of thermally stressed brook trout *Salvelinus fontinalis* portend the conservation potential of thermal refugia. *Journal of Fish Biology* 95: 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/jfb.14099>
- Woolway, R.I., Maberly, S.C. (2020): Climate velocity in inland standing waters. *Nature Climate Change* 10: 1124–1129. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0889-7>