

**ARBEITEN
DES DEUTSCHEN FISCHEREI-VERBANDES e.V.**

Heft 98

2019

**Klimawandel und Fischerei:
Auswirkungen, Risiken, Chancen
und Handlungsfelder**

herausgegeben von

Dr. Helmut Wedekind

ISSN 0415-6641

Deutscher Fischerei-Verband e.V.
Venusberg 36 20459 Hamburg
info@deutscher-fischerei-verband.de
www.deutscher-fischerei-verband.de

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
Dr. Helmut Wedekind	Vorwort	1
Prof. Dr. Myron Peck	Historische und zukünftige Auswirkungen des Klimawandels: Von Ökologie zu Ökonomie	7
Dr. Timo Basen Dr. Alexander Brinker	Folgen des Klimawandels in den Fließgewässern	45
Dr. Uwe Brämick Dr. Thomas Klefoth	Folgen von Klimaveränderungen für Fischbestände in Standgewässern: Mechanismen, Beispiele und Handlungsoptionen	71
Matthias Pfeiffer Dr. Gert Füllner	Auswirkungen des Klimawandels auf die Karpfenteichwirtschaft	105
Dr. Alexander Brinker	Die Perspektive der Forellenzucht in Zeiten von Wasserknappheit und Erwärmung	137
Dr. Patrick Polte	Hering in der Ostsee – Einfluss der Phänologie auf die Produktivität des Herings der westlichen Ostsee	153
Dr. Heino Fock	Veränderung der Verbreitung von Migration von Fischbeständen	165
Anhang I	Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats	177
Anhang II	Referenten	179
Anhang III	Resolution	181

Folgen von Klimaveränderungen für Fischbestände in Standgewässern: Mechanismen, Beispiele und Handlungsoptionen

Dr. Uwe Brämick, Institut für Binnenfischerei Potsdam-Sacrow

Dr. Thomas Klefoth, Anglerverband Niedersachsen

1. Einleitung

Aquatische Ökosysteme sind in unserer stark menschlich überprägten Landschaft einer Vielzahl von Stressoren ausgesetzt. Im Hinblick auf Fische und ihre Lebensräume in Standgewässern – hier nicht nur als Begriff für Seen, sondern auch für zeitweise oder dauerhaft stagnierende Wasserkörper z. B. in Kanälen verwendet – sind beispielsweise neben Nährstoffeinträgen und Verschmutzungen vor allem Verbauungen der Uferzone, Wasserentnahmen, touristische Nutzungen und Abtrennungen von Feuchtgebieten und anderen Wasserspeichern im Einzugsgebiet bedeutsam. Diese multifaktoriellen Stressoren resultieren in einer mehr oder minder starken Abweichung des ökologischen Zustandes der Gewässer vom Referenzzustand. So waren im Jahr 2015 nach Angaben des Umweltbundesamtes nur etwa ein Viertel der nach Wasser-Rahmenrichtlinie berichtspflichtigen stagnierenden Wasserkörper in Deutschland in einem guten bzw. sehr guten ökologischen Zustand (Umweltbundesamt 2015). In der Folge dieser dauerhaften und vielfältigen Stressoren sind Stabilität und Widerstandsfähigkeit

(Resilienz) der Systeme und der von ihnen besiedelten Fischbestände in Standgewässern stark belastet. Klimatische Veränderungen in kurzen Zeiträumen verstärken in diesem Zusammenhang den Stress zusätzlich. Ihre Effekte sind durch das bereits bestehende Konglomerat der genannten Einflussfaktoren im Einzelfall schwer separat quantifizierbar und oft durch diese bzw. deren paralleles oder additives Wirken maskiert.

2. Wirkfaktoren

Die aktuell stattfindenden und für die nächsten Jahrzehnte prognostizierten klimatischen Veränderungen umfassen viele Parameter und erhebliche regionale Unterschiede. In dem hier vorliegenden Beitrag liegt der Fokus auf prinzipielle Folgen veränderter Temperatur- und Niederschlagsgänge für Standgewässer und die von ihnen besiedelten Fischbestände in Deutschland. Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes zeigen, dass die Jahre seit 2001 wärmer und in Bezug auf den Niederschlag sehr variabel waren (DWD, 2019). Insgesamt kam es unter zunehmender Ausbildung von Wetterextremen (Trockenperioden und Starkniederschläge) zu einem deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur (2018 um 2 K!) und einem leichten Anstieg der Niederschlagsmengen im Jahresverlauf im Vergleich zum langjährigen Referenzzeitraum von 1961 - 1990. Aber auch die Verdunstung stieg aufgrund erhöhter Sonneneinstrahlung und wärmeren Temperaturen an, was zu einer negativen Bilanz für den Oberflächenabfluss führte. Prognosen bis zum

Ende des 21. Jahrhunderts gehen von einer Fortsetzung dieses Trends aus. Das Zukunftsszenario für deutsche Standgewässer beinhaltet somit höhere Wassertemperaturen und stärker schwankende Wassermengen.

3. Veränderungen im Lebensraum

Höhere Temperaturen und eine veränderte Niederschlagsdynamik beeinflussen Fischbestände direkt und vor allem auch indirekt. Veränderungen physiko-chemischer und limnologischer Parameter bzw. Prozesse in Standgewässern nehmen wesentlichen Einfluss auf die Lebensbedingungen aquatischer Organismen. Bereits vor mehr als 20 Jahren schlussfolgerten De Stasio et al. (1996) aus Ergebnissen von Modellierungen für kleine Seen in temperierten Zonen Europas, dass im Zuge klimatischer Veränderungen mit höheren epilimnischen Wassertemperaturen im Sommer zu rechnen ist – ähnlich, wie auch in lotischen Systemen. Allerdings fehlen in stagnierenden Wasserkörpern durch Turbulenzen verursachte Durchmischungen der Wassersäule mit Ausnahme der oberflächennahen Bereiche. Speziell bei tieferen lentischen Gewässern resultiert daraus eine stabilere vertikale Temperaturschichtung, die früher in der Saison einsetzt und länger anhält. Für den Bodensee zeigen Messreihen, dass infolge der höheren Schichtungsstabilität und der höheren Temperaturdifferenz zwischen Epilimnion und Hypolimnion vertikale winterliche Durchmischungen bereits heute seltener stattfinden und dazu öfter schwach bzw. unvollständig

bleiben. Dieser Trend wird sich voraussichtlich weiter fortsetzen (IGKB 2015, 2018; Abb. 1). Generell ist im Zuge der klimatischen Veränderungen eine Änderung der Mixis zu erwarten. Heute dauerhaft durchmischte Flachseen mit Maximaltiefen im Grenzbereich werden zukünftig sommerliche Stagnationsphasen ausbilden, winterliche Vollzirkulationen werden speziell in großen und tiefen Seen seltener (Adrian et al. 2016) und führen zu oligomiktischen Verhältnissen in heute dimiktischen Seen.

Aus Veränderungen im Schichtungsverhalten resultieren veränderte Stoffumsätze und Lebensbedingungen in den Gewässern. Während winterliche Eisbedeckungen und daraus folgende „Verschlüsse“ der Wasserkörper inklusive Sauerstoffmangelsituationen seltener werden, führen längere sommerliche Vertikalschichtungen zu häufigeren und längeren Anoxia im Tiefenwasser. Heterotrophen Organismen geht Lebensraum verloren und gewässerinterne Rücklösungen von Nährstoffen aus dem Sediment werden befördert. In Verbindung mit verstärkten Einträgen organischen Materials aus der Umgebung durch Starkregen und höheren Wassertemperaturen kann daraus ein Anstieg der Primärproduktion (Eutrophierung) resultieren. Diese Eutrophierung kann dann vor allem spätsommerliche Sauerstoffmangelsituationen im Sinne eines sich selbst verstärkenden Kreislaufs provozieren. Ein häufigeres Auftreten von Blaualgenblüten, die weniger gut von Zooplankton gefressen werden und Toxine sowie geschmacksbeeinträchtigende Aromate

produzieren können, ist nur eine von vielen weiteren potenziellen Folgen mit indirekten Auswirkungen auf Fischbestände und Fischerei.

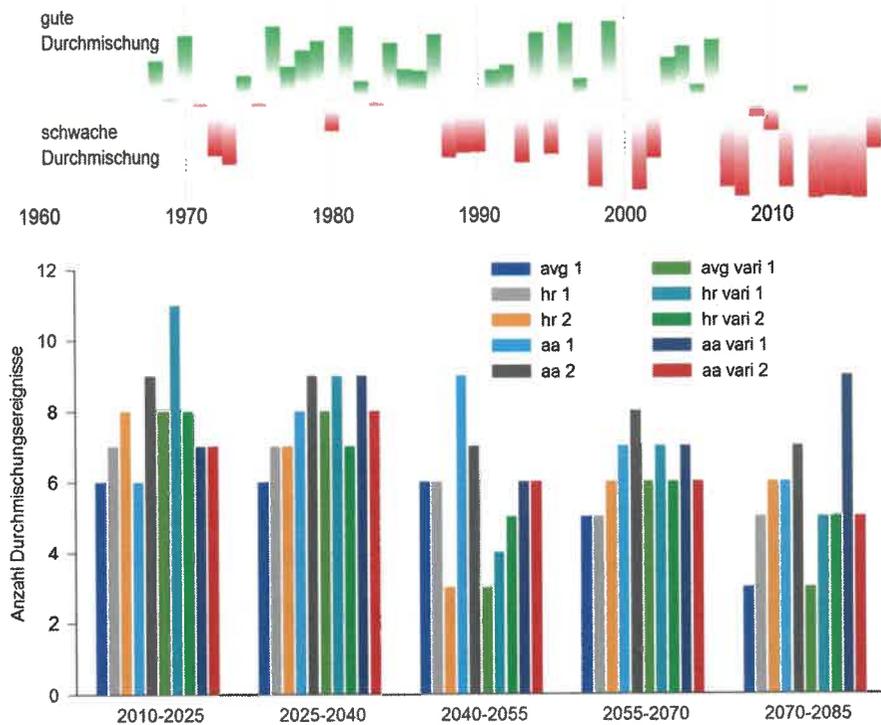


Abb. 1: Oben: Stärke winterlicher vertikaler Durchmischungen des Bodensees im Zeitraum 1970-2017; Unten: Anzahl modellierter Vollzirkulationen im Bodensee bei verschiedenen Klimaszenarien (Farbcode) in 15-Jahres-Zeiträumen (IGKB 2015, 2018)

Neben Veränderungen limnologischer Prozesse in stagnierenden Wasserkörpern bewirken häufigere sommerliche Trocken- und Hitzeperioden eine stärkere Verdunstung. Dies wiederum erhöht die Wahrscheinlichkeit von dauerhaften oder zumindest temporären

Niedrigwasserständen in Binnenseen - was im Kontrast zum erwarteten Wasserspiegelanstieg der Meere steht. So belegen Messungen für das Gebiet der Großen Seen in Nordamerika einen bereits heute eingetretenen Rückgang des Wasserspiegels um 1 m, der sich wahrscheinlich bis Ende des Jahrtausends auf bis zu 2,5 m fortsetzen wird (Gaeta et al. 2019, Schindler 2009). Damit einher geht ein Verlust strukturierter Litoralzonen, speziell im Sommer, und damit von wichtigen Reproduktions- und Jungfischhabitaten. Verschiedene Studien zeigen, dass speziell das Litoral entscheidend für die fischereiliche Produktivität von Seen ist (Vadeboncoeur et al. 2002; VanDer Zanden et al., 2006; (Karsson & Byström, 2005; Schindler & Scheuerell, 2002; Malkin et al., 2010). Bei ausgedehnten Trocken- und Starkregenperioden ist auch ein alternatives Szenario mit erhöhten Schwankungen des Wasserspiegels denkbar, was die Produktivität der Gewässer im Einzelfall über den aus der Teichwirtschaft bekannten „Erstbespannungseffekt“ sogar steigern könnte. Die eintretenden Effekte werden selbst innerhalb einer kleinen Region sehr seespezifisch sein und in Abhängigkeit von Gewässergröße, Gewässermorphologie, Windexposition, Grundwasserzustrom und vielen weiteren Faktoren stehen.

4. Reaktionen im Fischbestand und Folgen für dessen Bewirtschaftung

Verbreitung von Arten: Für Fischartengemeinschaften im Meer sowie in Fließgewässern wird speziell mit Blick auf den erwarteten

Temperaturanstieg eine nordwärts (Meer) bzw. stromauf (Fließgewässer) gerichtete Verschiebung von artspezifischen Verbreitungsgebieten erwartet (siehe z. B. Artikel von M. Peck und T. Baasen in diesem Heft). Da das Ausmaß der Verschiebung maßgeblich von der Temperaturtoleranz der jeweiligen Art aber auch von weiteren Parametern wie z. B. in Fließgewässern von deren Bindung an die Strömungsgeschwindigkeit abhängt, wird es voraussichtlich zu Veränderungen in der Zusammensetzung lokaler Fischzönosen kommen. Bei Fischarten in Standgewässern sind derartige Wechsel der Verbreitungsgrenzen aufgrund der oftmals isolierten Gewässerlage und daraus resultierenden starken Einschränkungen bezüglich weiträumiger Zu- und Abwanderungsmöglichkeiten problematischer. Ihnen bleiben in den meisten Fällen nur Wechsel zwischen den Lebensräumen innerhalb eines Gewässers. Für eurytherme Arten mit breiter Temperaturtoleranz, wie beispielsweise viele Cypriniden, wird mit dem Anstieg der mittleren und maximalen Wassertemperaturen sogar eine Ausweitung geeigneter Habitate in Standgewässern verbunden sein. Bestände kaltstenothermer Arten (z. B. Coregonen) könnten hingegen lokal und regional erlöschen (Graham & Harrod 2009). Dies hätte unmittelbare Folgen für die Artenvielfalt, da gerade kaltstenotherme Gattungen und Familien wie die erwähnten Coregonen einen hohen Anteil endemischer Arten (z. B. *Coregonus fontane*, *C. lucinensis*) aufweisen. Eine Metastudie von Comte et al. (2013) zeigt, dass die meisten veröffentlichten Einzelstudien eine Zunahme von warm-

sowie eurythermen Arten und eine Abnahme bis hin zum Verschwinden von kaltstenothermen Arten belegen bzw. prognostizieren. Die Befürchtung, dass diese Entwicklung auch in deutschen Binnengewässern auftreten könnte, ist daher durchaus berechtigt.

Mortalität: Infolge milderer Winter und einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit längerer Eisbedeckung werden die aus nährstoffreichen Flachseen des norddeutschen Tieflandes bekannten Fischsterben unter Eis seltener werden. Dagegen führen Sauerstoffdefizite in länger anhaltenden sommerlichen Stagnationsphasen und höhere Temperaturen im Epilimnion zu einer Einengung des Lebensraumes, insbesondere für Kaltwasserarten (Abb. 2). Seespezifische Modellierungen zeigen, dass eine Erwärmung der Lufttemperatur um 2–4 °C mit einer Verringerung des Sauerstoffgehalts im Hypolimnion um 2–4 mg/l bei gleichzeitig erhöhtem Sauerstoffbedarf der Fische einhergehen kann (Ficke et al. 2007). Das lässt die Wahrscheinlichkeit sommerlicher Fischsterben ansteigen. Das Auftreten von Starkregen nach längeren Trockenphasen und die damit verbundene Einspülung leicht abbaubarer organischer Substanz vom Ufer können die Situation zusätzlich verschärfen.

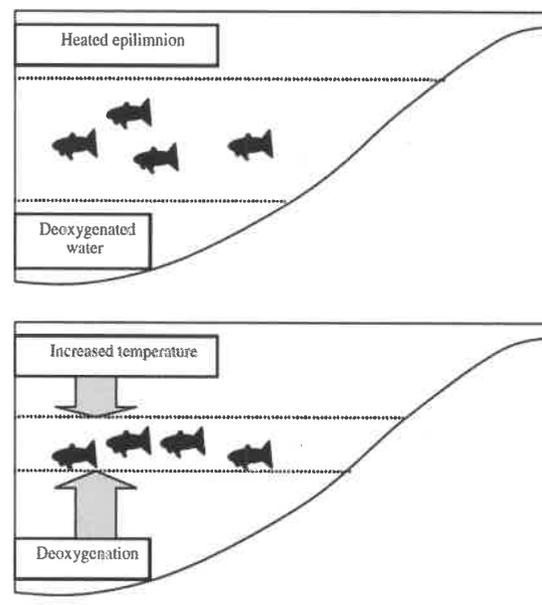


Abb. 2: Verringerung des Lebensraumes im Hypolimnion für stenotherme Arten infolge längerer sommerlicher Stagnationsphasen bei erhöhter Temperatur (aus Ficke et al. 2007)

Durch die Dichteabhängigkeit der Mortalität in Fischbeständen ist neben der skizzierten Sterblichkeit infolge von Sauerstoffmangel auch mit erhöhten Mortalitäten als Resultat temporär verringerter Habitatgrößen zu rechnen (Abb. 2). Für manche Arten bzw. Altersklassen können höhere Temperaturen aber auch positiv wirken und die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöhen. So diskutieren Jeppesen et al. (2012) beispielsweise, dass ein schnelleres Wachstum von 0+ Barschen in Jahren mit höheren Temperaturen in der Vegetationsphase deren Mortalität im ersten Winter senkt und erklären so die Beobachtungen positiver Korrelationen zwischen Sommertempe-

sowie eurythermen Arten und eine Abnahme bis hin zum Verschwinden von kaltstenothermen Arten belegen bzw. prognostizieren. Die Befürchtung, dass diese Entwicklung auch in deutschen Binnengewässern auftreten könnte, ist daher durchaus berechtigt.

Mortalität: Infolge milderer Winter und einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit längerer Eisbedeckung werden die aus nährstoffreichen Flachseen des norddeutschen Tieflandes bekannten Fischsterben unter Eis seltener werden. Dagegen führen Sauerstoffdefizite in länger anhaltenden sommerlichen Stagnationsphasen und höhere Temperaturen im Epilimnion zu einer Einengung des Lebensraumes, insbesondere für Kaltwasserarten (Abb. 2). Seespezifische Modellierungen zeigen, dass eine Erwärmung der Lufttemperatur um 2–4 °C mit einer Verringerung des Sauerstoffgehalts im Hypolimnion um 2–4 mg/l bei gleichzeitig erhöhtem Sauerstoffbedarf der Fische einhergehen kann (Ficke et al. 2007). Das lässt die Wahrscheinlichkeit sommerlicher Fischsterben ansteigen. Das Auftreten von Starkregen nach längeren Trockenphasen und die damit verbundene Einspülung leicht abbaubarer organischer Substanz vom Ufer können die Situation zusätzlich verschärfen.

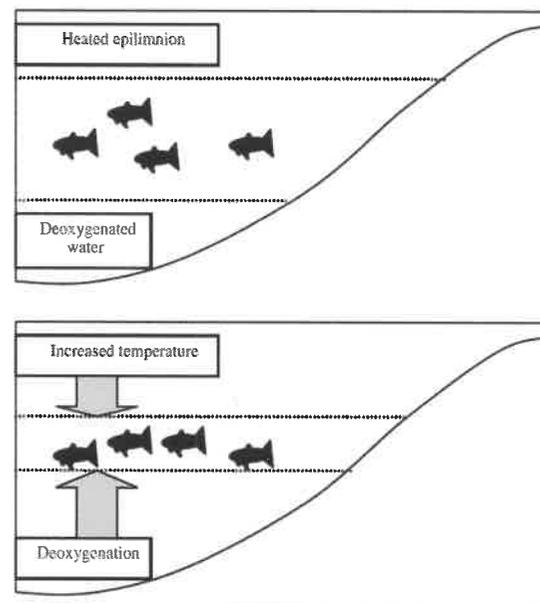


Abb. 2: Verringerung des Lebensraumes im Hypolimnion für stenotherme Arten infolge längerer sommerlicher Stagnationsphasen bei erhöhter Temperatur (aus Ficke et al. 2007)

Durch die Dichteabhängigkeit der Mortalität in Fischbeständen ist neben der skizzierten Sterblichkeit infolge von Sauerstoffmangel auch mit erhöhten Mortalitäten als Resultat temporär verringerter Habitatgrößen zu rechnen (Abb. 2). Für manche Arten bzw. Altersklassen können höhere Temperaturen aber auch positiv wirken und die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöhen. So diskutieren Jeppesen et al. (2012) beispielsweise, dass ein schnelleres Wachstum von 0+ Barschen in Jahren mit höheren Temperaturen in der Vegetationsphase deren Mortalität im ersten Winter senkt und erklären so die Beobachtungen positiver Korrelationen zwischen Sommertempe-

ratur und Jahrgangsstärke bei Barschen und Zandern in skandinavischen Seen wie sie von Lehtonen & Lappalainen (1995) gezeigt wurden (Abb. 3)

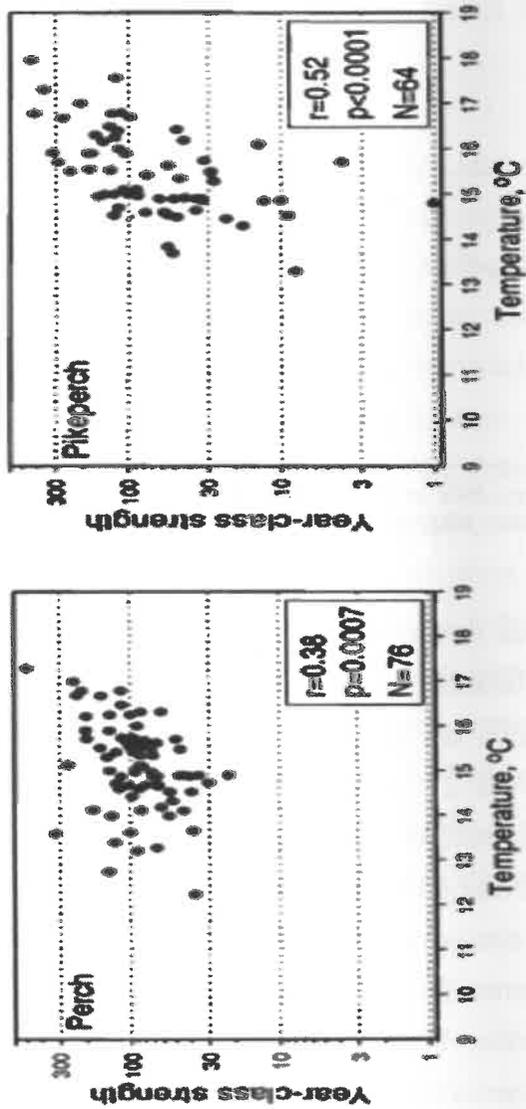


Abb. 3: Korrelation zwischen Jahrgangsstärke und mittlerer Wassertemperatur im Sommer für Barsch (links) und Zander (rechts) in skandinavischen Seen (aus Lehtonen & Lappalainen, 1995).

Wachstum: Für das individuelle und damit auch das Bestandswachstum von Fischen hat die Temperatur eine Schlüsselfunktion. Höhe und Spannweite des optimalen und eingeschränkten Temperaturbereichs sind dabei artspezifisch und bilden die Grundlage für eine Typisierung der heimischen Fischfauna in steno- und eurytherme Warm-, Kühl-, und Kaltwasserarten. Im jeweiligen optimalen Temperaturbereich ist die Wachstumsgeschwindigkeit am höchsten. Typische Fischartengemeinschaften in unseren temperierten Seen umfassen zumindest in geschichteten Gewässern in aller Regel sowohl steno- als auch eurytherme Arten aller drei Temperaturgilden. Vor diesem Hintergrund sind die Effekte einer Temperaturerhöhung auf das Wachstum artspezifisch. Bleiben die Temperaturen innerhalb des Optimalbereichs der Art, führt eine Erwärmung unter ansonsten identischen Bedingungen zu einem besseren Wachstum. Dabei ist auch von Bedeutung, wie sich die Anzahl an „Zuwachstagen“ (Growing Degree Days, GDD) verändert.

Während auf der Ebene von Individuen positive Korrelationen von Temperatur und Wachstumsgeschwindigkeit innerhalb des art-eigenen optimalen Temperaturbereichs zu erwarten sind, stellt sich die Situation aus einer mehr generalisierten Sicht auf Fischartengemeinschaften anders dar. Fischartengesellschaften in wärmeren Umwelten bestehen typischerweise aus kleinwüchsigeren Arten (z.B. Emmrich 2013, Rypel & David 2017). Gleichzeitig bleiben Individuen der gleichen Art in wärmerer Umwelt kleiner, wie

Jeppesen et al. (2010) am Beispiel des Barsches in schwedischen Seen zeigen konnten. Als ursächlicher Zusammenhang wird vermutet, dass Individuen einer Art in wärmeren Gewässern zwar zunächst ein schnelleres Wachstum zeigen, daraus aber eine frühere Anlage von Gonaden resultiert, die eine stärkere Energieinvestition in die Reproduktion und nicht mehr in das Wachstum bewirkt. Dies wiederum bewirkt eine Abnahme des somatischen Wachstums in späteren Lebensphasen und der erreichbaren Maximalgröße (Jeppesen et al. 2010).

Rekrutierung: Die Auswirkungen eines Temperaturanstiegs in Standgewässern unserer Region auf die Rekrutierung von Fischarten sind mechanistisch sehr komplex. Zunächst sind mögliche Veränderungen bezüglich des Eintritts der Geschlechtsreife zu berücksichtigen. Dieses korreliert in der Regel mit dem Alter oder/und der Größe des Individuums. Auch das Geschlecht spielt eine Rolle (z. B. Bone and Marshall 1985; Ficker et al. 2014). Ob ein Temperaturanstieg Auswirkungen auf das Geschlechterverhältnis in der Nachkommenschaft und darüber die Rekrutierung hat, ist bisher kaum untersucht. Laborexperimente mit juvenilen Fischen zeigen jedoch, dass erhöhte Temperaturen in den frühen Lebensphasen, z.B. bei Salmoniden, zu einem höheren Anteil funktionell männlicher Tiere führen können (Valdivia et al. 2014; Magerhans et al. 2009). Wie im vorangehenden Abschnitt dargestellt, können höhere Temperaturen bei manchen Arten in schnellerem Wachstum

resultieren. Eine darüber ausgelöste Vorverlegung des Geschlechtsreifealters ist bei einem Temperaturanstieg von 2 K kaum zu erwarten, allerdings mangelt es an gezielten Studien zu diesem Thema. Klarer scheint, dass durch schnelleres Wachstum die Größe bzw. Masse der Rogner eines Jahrgangs zunimmt. Da nicht nur die absolute sondern auch die relative Fruchtbarkeit von Rognern zumindest in den ersten Jahren positiv mit deren Größe korreliert (für *C. albula* z.B. Wanke et al. 2017), liefert die gleiche Laicherbiomasse mehr Eier. Über diesen Weg könnte es also zu einer Stärkung des Reproduktionserfolgs kommen. Hinzu kommt, dass finnische Untersuchungen auch für kaltstenotherme Coregonen eine hohe Flexibilität für die Dauer der Eientwicklung belegen (Karjalainen et al. 2014). Erhöhungen der Erbrütungstemperatur im Bereich um 2 K resultierten in einem früheren Schlupf, wobei die Schlupf- und Überlebensraten der Larven im Labor konstant blieben.

Ob eine Vorverlegung des Schlupfes allerdings unter natürlichen Bedingungen zu einem „Mismatch“ mit der Verfügbarkeit adäquater Nahrungsmengen und -qualitäten führen kann, bleibt für Süßwasserfischarten zu untersuchen. Der Beitrag von P. Polte im vorliegenden Heft geht dieser Frage am Beispiel von *C. Harengus* in der Ostsee nach.

Da die Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf den Vermehrungserfolg artspezifisch unterschiedlich sind, werden Verschiebungen in den Dominanzverhältnissen erwartet. Hansen et al. (2017) analysierten mehr als 2.500 Datensätze zum Vermehrungserfolg von Zander (*S. vitreus*) und Forellenbarsch (*M. salmoides*) in Seen in Wisconsin und identifizierten einen Kipppunkt bei einer Jahressumme von 2.300 - 2.500 Tagesgraden (Abb. 4). Bei geringeren Werten ist die Wahrscheinlichkeit starker Zandervermehrung hoch, bei Werten darüber gilt das für den Forellenbarsch. Eine darauf basierende Modellierung unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien zeigt, dass zanderdominierte Seen um mehr als 85% zurückgehen werden, während die Zahl an Forellenbarschseen bis Ende des 21. Jahrhunderts stark anwächst (Hansen et al. 2017).

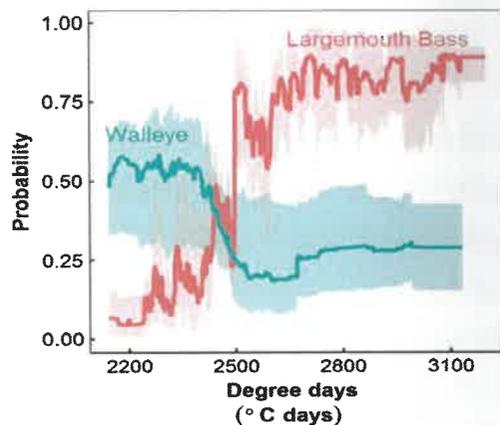


Abb. 4: Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Zandervermehrung (türkis) bzw. hoher Forellenbarschdominanz (rot) als Funktion der mittleren Jahreswassertemperatur (Tagesgradsumme) aus Hansen et al. (2017).

Klimawandel und Fischerei: Die erwerbsfischereiliche Nutzung von Binnengewässern in Deutschland ist seit Jahrzehnten sowohl in Bezug auf die Fangmengen als auch die Anzahl an Unternehmen rückläufig (Brämick 2018). Hauptursachen hierfür liegen in einer schwachen Position der Fischerei in der Auseinandersetzung mit anderen Interessensgruppen zur Nutzung und Entwicklung von Gewässern bzw. Biozönosen, schwierigen Vermarktungsbedingungen für viele Süßwasserfischarten bei einem globalisierten Fischmarkt und der bei Binnengewässern besonders starken Einwirkung externer und damit durch die Fischerei kaum beeinflussbarer Faktoren auf Fischbestände und ihre fischereiliche Nutzbarkeit (Brämick 2016). Vor diesem Hintergrund sind Folgen klimatischer Änderungen für die Situation und Perspektive der Fischerei bisher kaum betrachtet worden. Deutlich wird das z.B. bei einer Analyse der Anzahl und Tendenz von Aussagen zu Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland (adelphi 2015). Hier sind für die Fischwirtschaft (Fischerei und Aquakultur) im Vergleich zu anderen Handlungsfeldern nur sehr wenige Aussagen in den ausgewerteten Studien zu finden. Als Grund wird vermutet, dass von den Akteuren möglicherweise nur geringe Auswirkungen erwartet werden und die eigene Betroffenheit durch den Klimawandel noch nicht als sehr groß eingeschätzt wird (Basseur et al. 2017). Diese Einschätzung teilen wir angesichts eigener Untersuchungen und Beobachtungen sowie der weiteren Beiträge in diesem Heft nicht. Es ist vielmehr davon auszugehen,

dass die Folgen klimatischer Veränderungen einen weiteren bedeutsamen Stressor für Fischbestände und Fischerei darstellen, der allerdings in seiner Wirkung von anderen Faktoren oft überlagert wird.

5. Fallbeispiele für Folgen klimatischer Veränderungen aus Niedersachsen

In der fischereilichen Praxis wurden in den vergangenen Jahren bereits klimatisch bedingte Veränderungen der aquatischen Ökosysteme festgestellt. Dies betraf einen akuten Wasserverlust von Standgewässern ebenso wie das Auftreten von Fischsterben im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen. Einige der wichtigsten Beobachtungen aus Niedersachsen, kombiniert mit lokalen Datenerhebungen, werden nachfolgend vorgestellt.

Wasserverlust und Pegelschwankungen: Erhöhte Verdunstungsraten und stark schwankende Niederschlagsmengen mit längeren Dürreperioden während der Sommermonate haben den Grundwasserpegel auf einen aktuell historischen Tiefstand in Niedersachsen sinken lassen (Wriedt 2019). Dieser Wasserverlust übertrug sich in den vergangenen Jahren auch unmittelbar auf die Pegel der natürlichen und der künstlichen Oberflächengewässer. Das Steinhuder Meer, mit rund 29 km² der größte Natursee des Landes, vermeldete in den Herbstmonaten der Jahre 2018 und 2019 einen historischen Tiefwasserstand von 74 cm am Pegel

Wilhelmstein. Sowohl die kommerzielle Fischerei als auch die Angelfischerei wurden dadurch teilweise stark eingeschränkt, da Fischereigeräte nicht mehr effizient einsetzbar waren und Flachbereiche mit dem Boot unerreichbar wurden. Erstmals wurde zudem das vollständige Trockenfallen von Auengewässern und flachen Abgrabungsgewässern gemeldet. In der Leinemasch in Hannover kam es dabei zum vollständigen Verlust regional bedeutsamer Bitterlingsbestände (Klefoth et al. 2019). Da nur wenige Kleingewässer einem regelmäßigen Monitoring unterliegen, ist der ökologische und fischereiliche Schaden ausgeprägter Dürreperioden aktuell noch nicht hinreichend quantifizierbar. Die regionalen Gewässerbewirtschaftler, in der Regel Angelvereine, berichten allerdings vermehrt von vollständig trockenfallenden Seen und Teichen oder Teilabschnitten dieser Gewässer, wodurch die anglerische Nutzung stark eingeschränkt wird.

Kleine, künstlich geschaffene Abgrabungsgewässer mit einer Fläche < 20 ha repräsentieren die dominierende Standgewässerform in weiten Teilen Deutschlands und bieten insbesondere für Angelvereine eine wichtige Gewässerressource. Allein in Niedersachsen beläuft sich die Anzahl dieses Gewässertyps auf mehrere zehntausend (Nikolaus et al., unpubliziert). Aufgrund der anthropogenen Entstehungsgeschichte sind sie häufig sehr steilscharig und weisen nur geringe Litoralflächen auf. Eine landesweite Vermessung von 19 niedersächsischen Baggerseen (durchschnittliche Gewässerfläche

7,3 ha) ergab im September 2019 eine flächendeckende Pegelverringerung gegenüber dem Normalwasserstand in Folge anhaltender Niederschlagsdefizite in den Jahren 2018 und 2019. Durchschnittlich betrug die Pegelabsenkung 72 cm und schwankte zwischen 24 – 201 cm. Die Litoralfläche (definiert als 3 m Wassertiefe oder geringer) verringerte sich dadurch um durchschnittlich 11,6 %, wobei im Extremfall bis zu 44 % der flachen Uferzonen verloren gingen. Der relative Litoralverlust korrelierte positiv mit der mittleren Seentiefe (Abb. 5), sodass die Strukturvielfalt in besonders tiefen und steilscharigen Baggerseen durch den Wasserverlust überproportional stark abnahm. Trotz verstärkter Regenfälle von Dezember 2018 bis April 2019 konnte der sommerliche Wasserverlust in vielen Gewässern nicht vollständig kompensiert werden. Somit können sommerliche Trockenperioden auch jahresübergreifende Effekte auf die Fischfauna entwickeln.

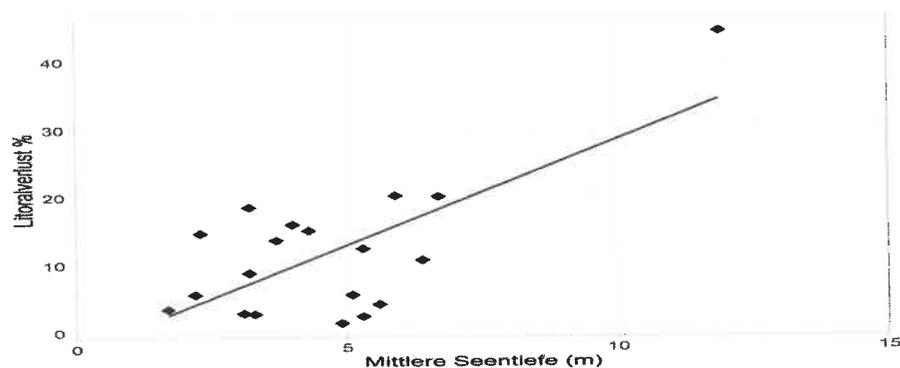


Abb. 5: Korrelation zwischen dem relativen Litoralverlust durch Grundwasserabfall und Niederschlagsmangel in den Jahren 2018 und 2019 und der mittleren Seentiefe am Beispiel von 19 niedersächsischen Baggerseen mit einer Größe von 1 – 19 Hektar. Die Messung erfolgte im September 2019 ($t = 4,01$, $df = 17$, $p < 0,001$, Pearson's $r = 0,697$)

Algenblüten: In den vorangestellten Ausführungen wurde bereits erwähnt, dass die prognostizierten klimatischen Veränderungen das Vorkommen von Cyanobakterien fördern können. Verstärkt durch die beschriebenen überproportionalen Verluste an Litoralfläche und in der Folge submerser Makrophyten, welche natürlicherweise Blaualgenblüten entgegenwirken, sind zukünftig häufigere Fischsterben und Sauerstoffmangelercheinungen aufgrund erhöhter Vorkommen von Blaualgen zu erwarten (Bakker & Hilt 2016; Adrian & Shatwell 2018). In der Praxis scheint sich dieses Szenario bereits heute zu bestätigen. Zwar liegen keine flächendeckenden Erhebungen vor, allerdings wurden in den Sommermonaten der Jahre 2018 und 2019 vermehrt Blaualgenblüten, teilweise verbunden mit lokalem Fischsterben, beim Anglerverein Niedersachsen gemeldet. Dies traf insbesondere für nährstoffreiche Flachgewässer natürlichen Ursprungs wie den Alveser See, flache Stauseen wie den Alfsee und viele Baggerseen in allen Regionen des Landes zu.

Fischkrankheiten: In der kommerziellen Fischerei und in der Aquakultur wird intensiv über das Potential neuer Krankheitsbilder bei Fischen sowie eine Zunahme von Parasiten in Folge ansteigender Wassertemperaturen diskutiert (Cochrane et al. 2009). In der praktischen Standgewässerbewirtschaftung in Deutschland sind diese Probleme bisher selten aufgetreten. Eine Ausnahme bildet die sogenannte Süßwasser-Aal-Rotseuche. Diese bakterielle Krankheit tritt primär bei Wassertemperaturen oberhalb von 24 °C auf und

wurde im Hochsommer 2018 vereinzelt in kleinen, flachen und nährstoffreichen Seen mit hoher Bestandsdichte beobachtet (bspw. Stadtgraben in Wolfenbüttel). Lehmann et al. (2007) bezeichnen die Bakterien des *Aeromonas hydrophila/sobria* – Komplexes als die wichtigsten bakteriellen Erreger in unseren heimischen Aalbeständen, da sie die Süßwasser-Aal-Rotseuche verursachen, die vergleichsweise häufig auftritt und dabei hohe Verluste hervorruft. Zunehmend hohe Wassertemperaturen im Sommer können somit zumindest mit Blick auf die Aalfischerei zusätzliche Mortalitäten durch Krankheiten hervorrufen und einen regional bedeutsamen fischereilichen Schaden bewirken.

Anreicherung natürlicher fischtoxischer Substanzen: Eine in der deutschen Fischereipraxis bisher kaum beachtete Form des Fischsterbens trat erstmals im Winter 2018 in den Küstengebieten Niedersachsens auf. In den stark vernetzten Gräben und Kanalsystemen der Landkreise Cuxhaven und Stade kam es zu lokalen Totalverlusten der Fischbestände. Entlang der gesamten deutschen Küstenlinie sind häufig sogenannte „potentiell sulfatsaure Böden“ anzutreffen. Diese Bodenbezeichnung umfasst Böden, Sedimente und Torfe mit geogen bedingten hohen Gehalten an reduzierten anorganischen Schwefelverbindungen, die wegen der konstant hohen Grundwasserstände unter anaeroben Bedingungen konserviert wurden (Heumann et al. 2018). Bei diesen säurebildenden Schwefelverbindungen handelt es sich vor allem um Eisensulfide,

welche in Form von Pyrit vorliegen. Aufgrund der langanhaltenden Trockenheit im Sommer 2018 kam es zu einem Sauerstoffkontakt des im Boden eingelagerten Pyrits. Bedingt durch die daraus resultierenden Oxidationsprozesse konnten erhebliche Mengen an Säure und Sulfat freigesetzt werden (Klefoth et al. 2019). Da die Säureneutralisationskapazität der pyridhaltigen Böden (insbesondere Torfe) nicht ausreichte um die Säurebildung zu puffern, sank der pH-Wert der Böden auf Werte unter 4. Unter diesen Bedingungen kam es zu erhöhten Schwermetallverfügbarkeiten, bzw. zu einer Löslichkeit von natürlichen Metallen wie Aluminium im Sickerwasser. Mit den einsetzenden Regenfällen im Herbst/Winter 2018 wurden diese gelösten Schwermetalle in die Graben- und Kanalsysteme der norddeutschen Tiefebene eingespült und verursachten Fischsterben. Noch Tage nach dem ersten Auffinden toter Fische ergaben Wasserproben der Landkreise und der bewirtschaftenden Angelvereine Aluminiumkonzentrationen von 1,67 mg/l. Diese Konzentrationen waren bei den vorherrschenden pH-Werten im Wasser von deutlich < 4 als hoch fischgiftig einzustufen (Birchall et al. 1989; Sutela & Vehanen 2017). Trotz erhöhter Niederschlagsmengen im Jahr 2019 wiederholte sich das Fischsterben in den betroffenen Gewässern im Folgejahr und trat erstmals auch im Landkreis Friesland auf. Ähnliche, auf die Einspülung von natürlichem Aluminium auf potentiell sulfatsauren Böden zurückzuführende Fischsterben unter fast identischen Bedingungen sind beispielsweise aus Finnland und Australien bekannt (Hyne & Wilson 1997; Sutela &

Vehanen 2017). Da der Oxidationsprozess des Pyrids nach einmaligem Sauerstoffkontakt nicht abgeschlossen ist und über Jahrzehnte fortauern kann, ist mit vergleichbarem Fischsterben nach erheblicher Trockenheit auch in den kommenden Jahren und Jahrzehnten zu rechnen.

6. Reaktionen der Angler auf klimatische Veränderungen

Aktuell wird angenommen, dass klimatische Veränderungen nicht nur die aquatischen Ökosysteme, sondern auch das menschliche Verhalten beeinflussen. Nach Hunt et al. (2016) werden Angler in ihrer Gewässerwahl und der Befischungsintensität auf klimatisch bedingte Veränderungen im Fischbestand reagieren. Zudem gehen die Autoren davon aus, dass wärmere Wetterbedingungen die Intensität der Angelei beeinflussen und ein moderater Temperaturanstieg in den gemäßigten Klimazonen den Fischereiaufwand steigern kann. Am Beispiel des Elbe-Seitenkanals (ESK) wurde die Hypothese überprüft, dass die Befischungsintensität der lokalen Angler mit wärmeren und damit für den Angler angenehmeren Wetterbedingungen ansteigt. Dazu wurden die individuellen Angeltage pro Jahr von 2013 bis 2018 auf den Jahreserlaubnisscheinen erfasst und die Angelaktivitäten mit den Wassertemperaturen in Verbindung gesetzt. Insgesamt wurden dabei 20.388 Angeltage in 3.396 individuellen Angeljahren berücksichtigt. Die Wassertemperatur (°C, Mittelwert pro Tag) wurde von der Wasserschiffahrtsverwaltung für den mit dem ESK in Verbin-

dung stehenden Mittellandkanal für die Jahre 1999 – 2018 zur Verfügung gestellt. Im Zeitraum 1999 – 2012 lag die durchschnittliche Wassertemperatur mehr als ein Grad unterhalb des untersuchten Zeitraums von 2013 – 2018 (mittlere Jahreswassertemperatur von 1999 – 2012 = 11,58 °C und von 2013 – 2018 = 12,64 °C) und besonders hohe Wassertemperaturen waren in diesen sechs Jahren häufiger (Abb. 6).

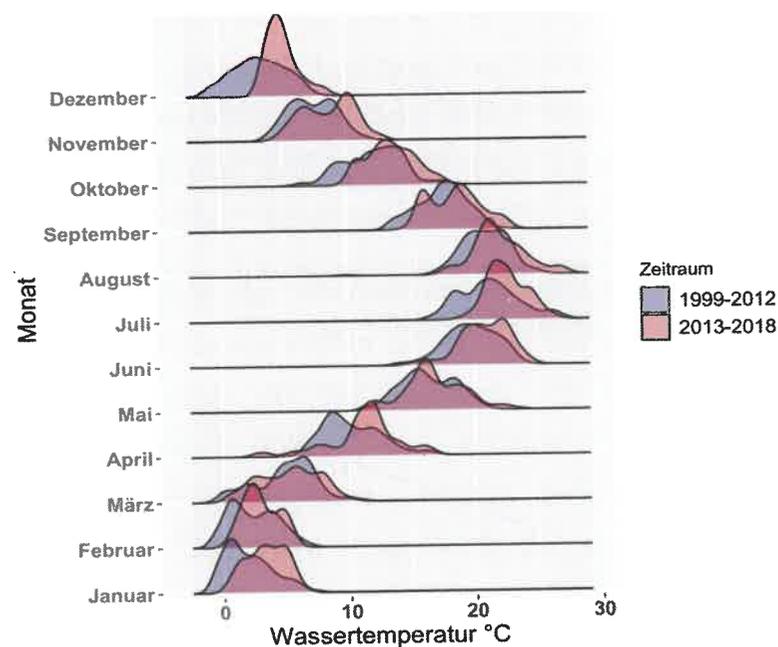


Abb. 6: Temperatur-Häufigkeitsverteilung des an den Elbe-Seitenkanal angrenzenden Mittellandkanals in den Zeiträumen 1999 – 2012 und 2013 – 2018.

Die Dauer der Angelsaison, definiert als Zeitdifferenz zwischen dem ersten und dem letzten Angeltag innerhalb eines Jahres für jeden individuellen Angler, korrelierte positiv mit der Häufigkeit (Anzahl

Tage) von Wassertemperaturen über 15 °C (Abb. 7). Witterungsbedingungen haben also maßgeblich bestimmt, wann die Angelsaison begann und wann sie endete. Ab einer Wassertemperatur > 10 °C stieg zudem die Anzahl der realisierten Angeltage innerhalb einer Saison, sodass der Fischereiaufwand bei steigenden Temperaturen gemäß der Hypothese zunahm (Abb. 8). Die vorliegende Analyse basiert allerdings auf lediglich sechs aufeinanderfolgenden Jahren, beinhaltet daher nicht die vollständige Witterungsvariabilität über einen längeren Zeitraum und zeigt im Falle der in Abb. 8 dargestellten Korrelation auch keinen eindeutig signifikanten Zusammenhang. Ein Pearson's r von 0,782 lässt aber trotz oder gerade wegen des geringen Stichprobenumfangs einen starken Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur und den realisierten Angeltagen pro Saison vermuten.

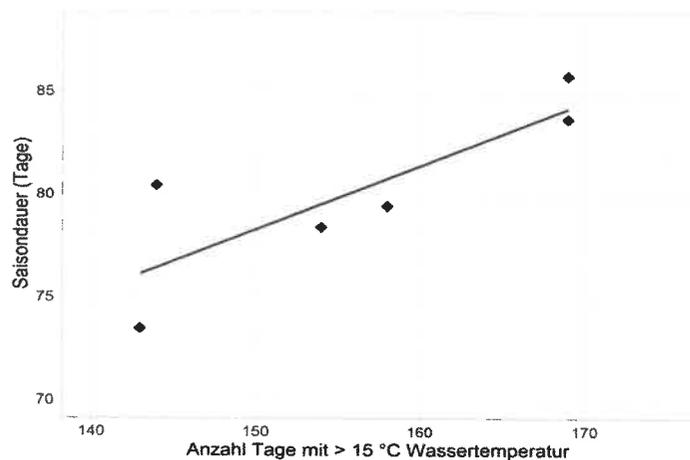


Abb. 7: Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Wassertemperatur > 15 °C und der mittleren Angelsaisondauer von 2013 – 2018 ($S = 6,59$, $p < 0,05$, Spearman's $\rho = 0,812$).

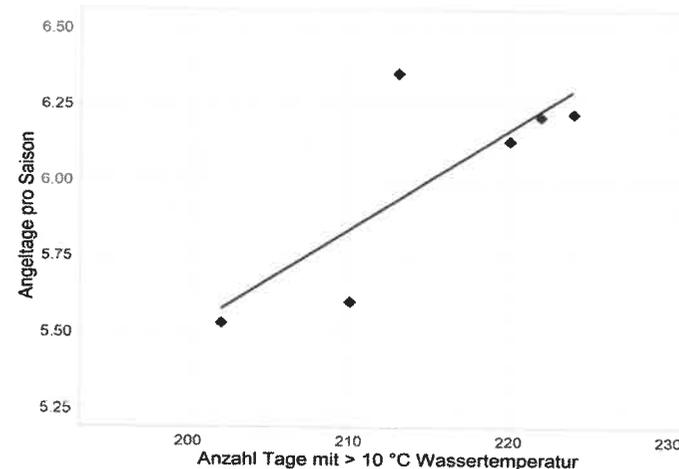


Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Wassertemperatur > 10 °C und der durchschnittlich realisierten Angeltage pro Saison ($t = 2,51$, $df = 4$, $p = 0,066$, Pearson's $r = 0,782$).

Eine Zunahme der Angelaktivitäten (Angeltage) bei fortwährend wärmerer Witterung könnte nicht nur Einfluss auf das menschliche Freizeitverhalten, die Fischbestände und den Fischereiaufwand haben, sondern aufgrund der erhöhten Aktivitäten auch einen zusätzlichen ökonomischen Nutzen generieren (Mendelson & Markowski 1999; Hunt et al. 2016). Entsprechende Schätzungen wurden bisher allerdings kaum angestellt und müssen zudem die möglichen negativen Wirkfaktoren wie Wetterextreme und eine potentiell verringerte fischereiliche Qualität berücksichtigen. Daher besteht weiterhin hoher Bedarf an (Langzeit)Datensätzen, mit denen das Verhalten der Angler im Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen analysiert werden kann.

7. Handlungsoptionen für die Praxis und bestehender, angewandter Forschungsbedarf

Klimatische Veränderungen entfalten bereits heute erhebliche und insbesondere in den beiden letzten Sommern deutlich gewordene Wirkungen auf Standgewässer, die darin lebenden Fischbestände und deren Nutzung. Erste regionale Beispiele bestätigen einige der prognostizierten Folgen. Daraus erwächst ein zunehmender Handlungsdruck sowohl für Fischereiunternehmen als auch für Akteure der Angelfischerei. Verbreitete Werkzeuge bei der Bewirtschaftung stehender Gewässer sind Schon- und Entnahmebestimmungen, Fischbesatz, und Verbesserungen von Habitatstrukturen. Diese Bewirtschaftungsinstrumente sind nach unserer Auffassung grundsätzlich auch dazu geeignet, die Binnenfischerei an die klimatischen Veränderungen anzupassen und die Fischbestände gegenüber anthropogenen Stressoren zu stabilisieren. So sind in Erwartung zunehmender Erwärmung, milderer Winter und daraus resultierender Veränderungen der Laich- und Schlupfzeitpunkte angepasste Schonzeiten ein erfolgsversprechender Ansatz. Gleiches gilt für Entnahmeregularien. Ändern sich Wachstum und Eintritt der Geschlechtsreife, könnten Anpassungen von Mindestmaßen oder ergänzende Entnahmeregeln zur Stabilisierung der Rekrutierung und Erhöhung der Vermehrungsraten wirksam sein. Rückzugsgebiete für Fische können durch die Ausweisung von Schongebieten realisiert werden, die unter einem Szenario veränderter Wasserstände ausgewählt oder gezielt aufgewertet werden. Da die

Gewässer und die darin lebenden Fische voraussichtlich sehr unterschiedlich von den klimatischen Veränderungen betroffen sein werden und entsprechend unterschiedlich stark reagieren, kann die Regionalisierung der fischereilichen Bewirtschaftung in Bezug auf Schonzeiten und Entnahmebestimmungen, bis hin zu gewässerspezifischen Regularien, ein geeignetes Anpassungsinstrument sein. Zentral ist dabei auch die Etablierung eines gezielten Monitorings zur Dokumentation und Überprüfung der Fischbestände und der Evaluation durchgeführter Maßnahmen. Dem potentiell andauernden Verlust der Litoralstrukturen kann zudem durch Habitataufwertungen begegnet werden. Das Schaffen neuer Flachwasserzonen oder die Substitution verlorengangener submerser Makrophyten durch Totholzeintrag wird aktuell im Rahmen des Projekts BAGGERSEE (www.baggersee-forschung.de) erprobt und erforscht. Die gezielte Förderung diversifizierter Litoralstrukturen soll die Jungfischmortalität verringern und die Rekrutierung fördern und so die Fischbestände insgesamt stabilisieren.

Bei veränderten Temperaturgängen in isolierten Standgewässern kommt bei der Durchführung von Fischbesatz der Auswahl geeigneter, angepasster Herkünfte erhebliche Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang muss auch darüber diskutiert werden, ob die gezielte Ansiedlung eurythermer Arten im Falle des Verlustes kaltstenothermer Arten eine akzeptable Strategie zur Erhaltung von Artendiversität sein kann.

Forschungsbedarf: Die Diskussion um die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Standgewässersysteme, Fischbestände und die Binnenfischerei ist bisher von einer erheblichen Datenarmut, insbesondere in Mitteleuropa, geprägt. Zu einer qualifizierten Bewertung von Risiken aber auch Chancen werden biologische, ökologische und sozioökonomische Studien benötigt. Neben diesen gezielten Studien kommt langfristigen Monitorings und Datensammlungen eine hohe Bedeutung für das Verständnis von Veränderungen zu. Der stärkste Mangel an biologischen und ökologischen Daten besteht in diesem Zusammenhang bei Standgewässern mit einer Wasserfläche unter 50 Hektar sowie fast alle Gräben und Kanalsysteme bis hin zu den künstlichen Bundeswasserstrassen, die allesamt nicht im Zuge der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie regelmäßig beprobt werden.

Weiterhin besteht Forschungsbedarf zur Eignung von Maßnahmen, welche den negativen Auswirkungen der Klimaveränderungen entgegenwirken und die Fischbestände stabilisieren sollen. Möglichkeiten und Grenzen eines angepassten fischereilichen Managements im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen, steigenden Temperaturen, Einwirkungen der regionalen Landnutzung und verändertem menschlichen Verhalten sind bisher nicht ausreichend untersucht und bewertet worden. Hinzu kommt die Entwicklung und Prüfung von Handlungsleitfäden für Bewirtschafter zur Anpassung an ökosystemare Veränderungen.

Literatur:

- ADELPHI, PRC, EURAC** (2015). Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_0.pdf
- ADRIAN, R., HESSEN, D.O., BLENCKER, T., HILLEBRAND, H., HILT, S., JEPPESEN, E., LIVINGSTONE, D.M., TROLLE, D.** (2016): Environmental Impacts—Lake Ecosystems. In: M. Quante and F. Colijn (eds.), North Sea Region Climate Change Assessment, Regional Climate Studies, DOI 10.1007/978-3-319-39745-0_10
- ADRIAN, R. & SHATWELL, T.** (2018). Seen im Klimawandel. Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin. IGB Dossier
- BAKKER, E. S. & HILT, S.** (2016). Impact of water-level fluctuations on cyanobacterial blooms: options for management. *Aquatic ecology* 50(3), 485-498
- BIRCHALL, J. D., EXLEY, C., CHAPPELL, J. S. & PHILLIPS, M. J.** (1989). Acute toxicity of aluminium to fish eliminated in silicon-rich acid waters. *Nature* 338(6211), 146
- BONE, Q. & MARSHALL, N.B.** (1985). *Biologie der Fische*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 236
- BRÄMICK, U.** (2016). Besonderheiten der fischereilichen Bewirtschaftung von Binnengewässern. *Arbeiten des Deutschen Fischerei-Verbandes* 94, 25-58
- BRÄMICK, U.** (2018). Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2017. www.portal-fischerei.de und www.ifb-potsdam.de; 57
- BRASSEUR, G.P., JACOB, D. & SCHUCK-ZÖLLER, S.** (2017). Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum DOI 10.1007/978-3-662-50397-3, 352

- COCHRANE, K., DE YOUNG, C., SOTO, D. & BAHRI, T.** (2009). Climate change implications for fisheries and aquaculture. *FAO Fisheries and aquaculture technical paper 530*, 212
- COMTE, L., BUISSON, L., DAUFRESNE, M., GRENOUILLET, G.** (2013): Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology* (2013) 58, 625–639
- DESTASIO, B.T., HILL, D.K., KLEINHANS, J.M., NIBBELINK, P.N., MAGNUSON, J.J.** (1996): Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton. *Limnol. Oceanogr.* 41(5), 1136-1149
- DWD Deutscher Wetterdienst** (2019): https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190102_waermstes_jahr_in_deutschland_2018.pdf
- EMMRICH, M.** (2013). Fish assemblages in European lakes - Comparison of sampling methods and analysis of size structure. Humboldt-Universität zu Berlin, Dissertationsschrift, 151
- FICKE, A.D., MYRICK, C.A. & HANSEN, L.A.** (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater. *Rev Fish Biol Fisheries* 17, 581-613
- FICKER, H., MAZZUCCO, R., GASSNER, H., WANZENBÖCK, J. & DIECKMANN, U.** (2014). Fish length exclusively determines sexual maturation in the European whitefish *Coregonus lavaretus* species complex. *Journal of Fish Biology*, DOI: 10.1111/jfb.12301
- GAETA, J.W., SASS, G.G. & CARPENTER, S.R.** (2019). Drought-driven lake level decline: effects on coarse woody habitat and fishes *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 71, 315-325
- GRAHAM, C.T. & HARROD, C.** (2009): Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *J.Fish.Biol.*, <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02180.x>

- HANSEN, G.J.A., READ, J.S., HANSEN, J.F., WINSLOW, L.A.** (2017): Projected shifts in fish species dominance in Wisconsin lakes under climate change. *Global Change Biology* (2017) 23, 1463–1476
- HEUMANN, S., GEHRT, E. & GRÖGER-TRAMPE, J.** (2018). Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten: Entstehung, Vorerkundung und Auswertungskarten. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. *Geofakten* 24
- HUNT, L. M., FENICHEL, E. P., FULTON, D. C., MENDELSON, R., SMITH, J. W., TUNNEY, T. D., LYNCH, A. J., PAUKERT, C. P. & WHITNEY, J. E.** (2016). Identifying alternate pathways for climate change to impact inland recreational fishers. *Fisheries* 41(7), 362-372
- HYNE, R. V. & WILSON, S. P.** (1997). Toxicity of acid-sulphate soil leachate and aluminium to the embryos and larvae of Australian bass (*Macquaria novemaculeata*) in estuarine water. *Environmental Pollution* 97(3), 221-227
- IGKB** (2015): KlimBo – Klimawandel am Bodensee. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe, Bericht Nr. 60, 136 S.
- IGKB** (2018): Jahresbericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee. *Limnologischer Zustand des Bodensees* Nr. 42 (2016-2017), 133 S.
- JEPPESEN, E., MEERHOFF, M., HOLMGREN, K., GONZA'LEZ-BERGONZONI, I., TEIXEIRA-DE MELLO, F., DECLERCK, S.A.J., DE MEESTER, L., SØNDERGAARD, M., LAURIDSEN, T.L., BJERRING, R., CONDE-PORCUNA, J.M., MAZZEO, N., IGLESIAS, C., REIZENSTEIN, M., MALMQUIST, H.J., LIU, Z., BALAYLA, D., LAZZARO, X.** (2010): Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia* (2010) 646:73–90

- JEPPESEN, E., MEHNER, T., WINFIELD, I.J., KANGUR, K., SARVALA, J., GERDEAUX, D., RASK, M., MALMQUIST, H.J., HOLMGREN, K., VOLTA, P., ROMO, S., ECKMANN, R., SANDSTROM, A., BLANCO, S., KANGUR, A., RAGNARSSON S.H., TARVAINEN, M., VENTELA, A.M., SONDERGAARD, M., LAURIDSEN, T.L. & MEERHOFF, M.** (2012). Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia* 694(1), 1-39
- KARSSON, J. & BYSTRÖM, P.** (2005). Littoral energy mobilization dominates energy supply for top consumers in subarctic lakes. *Limnology and Oceanography* 50, 538-543
- KARJALAINEN, J., KESKINEN, T., PULKKANEN, M., MARJOMÄKI, T.J.** (2014). Climate change alters the egg development dynamics in cold-water adapted coregonids. *Environ Biol Fish*, DOI 10.1007/s10641-014-0331-y
- KLEFOTH, T., EMMRICH, M., GERKEN, R., WOLF, K., FOCKE, R. & MÖLLERS, F.** (2019). Hitzesommer 2018 – eine Bilanz aus Sicht der Fische und der Angler. Geschäftsbericht des Anglerverband Niedersachsen e.V. 2018 https://av-nds.de/images/2019_BEITRAEGE/2019_28_WEB_GB2018/2019-05-09_AVN-Geschaeftsbericht2018_WEB.pdf
- LEHMANN, J., STÜRENBERG, F. J. & SCHÄFER, W.** (2007). Überblick über die Krankheiten des Europäischen Aals. *Arbeiten des Deutschen Fischereiverbandes* 85, 27-36
- LEHTONEN, H. & LAPPALAINEN, J.** (1995). The effects of climate on the year-class variations of certain freshwater fish species. In BEAMISH, R. J. (ed.), *Climate Change and Northern Fish Populations* 121. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, Ottawa, Canada, 37-44
- MAGERHANS, A., MÜLLER-BELECKE, A., & HÖRSTGEN-SCHWARK, G.** (2009). Effect of rearing temperatures post hatching on sex ratios of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) populations. *Aquaculture* 294(1-2), 25-29

- MALKIN, S.Y., BOCANIOV, S.A., SMITH, R.E., GUILDORD, S.J. & HECKY, R.E.** (2010). In situ measurements confirm the seasonal dominance of benthic algae over phytoplankton in nearshore primary production of a large lake. *Freshwater Biology*, early view, doi:10.1111/j.1365-2427.2010.02477
- MENDELSON, R. & MARKOWSKI, M.** (Eds.). (2004). The impact of climate change on outdoor recreation in Mendelsohn, R. & Neumann, J.E. (eds.) *The impact of climate change on the United States economy*. Cambridge University Press
- RYPEL, A. L & DAVID, S.R.** (2017). Pattern and scale in latitude–production relationships for freshwater fishes. *Ecosphere* 8(1):e01660. 10.1002/ecs2.1660
- SCHINDLER D.E. & SCHEUERELL M.D.** (2002). Habitat coupling in lake ecosystems. *Oikos* 98, 177-189
- SCHINDLER, D.W.** (2009). Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes. *Limnol. Oceanogr.* 54(6), 2349-2358 doi:10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2349
- SUTELA, T. & VEHANEN, T.** (2017). The effects of acidity and aluminium leached from acid-sulphate soils on riverine fish assemblages. *Boreal Environment Research* 22, 385-391
- UMWELTBUNDESAMT** (2015). Bewirtschaftungspläne für die Periode 2016 bis 2021. Berichtportal WasserBLlck / Bundesanstalt für Gewässerkunde. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/zustand-der-seen#textpart-1>
- VADEBONCOEUR, Y., VANDER ZANDEN, M.J., & LODGE, D.M.** (2002). Putting the lake back together: Reintegrating benthic pathways into lake food web models. *Bioscience* 52(1), 44-54, doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0044:PTLBTR]2.0.CO;2

- VALDIVIA, K., JOUANNO, E., VOLFF, J. N., GALIANA-ARNOUX, D., GUYOMARD, R., HELARY, L. & GUIGUEN, Y. (2014).** High temperature increases the masculinization rate of the all-female (XX) rainbow trout "Mal" population. *PloS one* 9(12), e113355
- VANDER ZANDEN, M.J., CHANDRA, S., PARK, S., VADEBONCOEUR, Y. & GOLDMAN, C.R. (2006).** Efficiencies of benthic and pelagic trophic pathways in a subalpine lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63, 2608-2620
- WANKE, T, BRÄMICK, U. & MEHNER, T. (2017).** High stock density impairs growth, female condition and fecundity, but not quality of early reproductive stages in vendace (*Coregonus albula*). *Fisheries Research* 186, 159-167
- WRIEDT, G. (2019).** Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation im Trockenjahr 2018. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz