

Ein begehrter Treibstoff: Gelöster Sauerstoff in Gewässern

Ein altbekannter Indikatorwert für Wasserqualität auf Landschaftsskala in neuem Licht

David R. Piatka (Erlangen, Garmisch-Partenkirchen), Johannes A.C. Barth (Erlangen), Romy Wild, Jürgen Geist (Freising), Robin Kaule, Lisa Kaule, Benjamin Gilfedder, Stefan Peiffer und Birgit Thies (Bayreuth)

Zusammenfassung

Fließgewässer sind Lebensräume für eine Vielzahl an Organismen und durch den Klimawandel besonders betroffen. In diesem Beitrag werden zunächst die wichtigsten Quellen und Senken des gelösten Sauerstoffs in aquatischen Ökosystemen thematisiert. Eine Analyse von über 170 000 globalen Flusswasser-Messdaten in der Studie Piatka et al. (2021) konnte wasserchemische Parameter und Einzugsgebietscharakteristika zu gelöstem Sauerstoff in Beziehung setzen. Als wichtigen Einflussfaktor ergaben diese Analysen die Wassertemperatur, von der auch physikochemisch die Sauerstofflöslichkeit abhängt. Des Weiteren geht die Studie auf (1) Anwendung von Sauerstoffumsätzen mit stabilen Isotopen, (2) Einflüsse des Grundwassers auf Sauerstoffdynamiken in Oberläufen, (3) die Rolle der Eisenoxide und (4) Auswirkungen der Klimastressoren in Fließrinnenexperimenten auf Sauerstoffhaushalt und Fischreproduktion genauer ein. Auf Basis ihrer Analysen empfehlen die Autoren, dem gelösten Sauerstoff beim Monitoring von Fließgewässern im Kontext des Klimawandels verstärkt Beachtung zu schenken.

Schlagwörter: Gelöster Sauerstoff, Flüsse, global, regional, Wasserchemie, Sauerstoffhaushalt, Klimawandel

DOI: 10.3243/kwe2022.07.002

Abstract

A highly prized propellant: Dissolved oxygen in water bodies

Looking at a well-known indicator of water quality on landscape scale in a fresh light

Watercourses are habitats for a wide variety of organisms and are especially impacted by climate change. This article first addresses the leading sources and sinks of dissolved oxygen in aquatic ecosystems. An analysis of more than 170,000 global river water readings in the study by Piatka et al. correlated hydrochemical parameters and river basin characteristics on dissolved oxygen. These analyses found that key influences were the temperature of the water, which also determines oxygen solubility from a physicochemical perspective. It also looks in greater detail at (1) the use of oxygen turnover with stable isotopes, (2) how groundwater influences oxygen dynamics in headwaters, (3) the role played by iron oxide and (4) the impacts of climate stressors in stream experiments on the oxygen balance and fish reproduction. Based on these findings, the authors recommend paying greater attention to dissolved oxygen when monitoring watercourses in the context of climate change.

Key Words: dissolved oxygen, rivers, global, regional, hydrochemistry, oxygen balance, climate change

Einleitung

Der kontinuierliche Eintrag von gelöstem Sauerstoff ist für die meisten im Wasser lebenden Organismen eine essentielle Lebensgrundlage. Durch seine geringe und temperaturabhängige Löslichkeit in Wasser handelt es sich bei Sauerstoff um ein knappes Gut, dessen Verfügbarkeit für Gewässerlebewesen durch Klimaveränderungen und Eingriffe der Menschen in aquatische Ökosysteme gefährdet wird. Anhand weltweiter Messdaten zeigen Piatka et. al. [1], dass Flüsse die biogeochemischen Prozesse ganzer Einzugsgebiete integrieren. Damit können auch ihre Sauerstoffdynamiken wichtige Hinweise auf die „Gesundheit“ bzw. den Zustand der umgebenden Ökosysteme und Landschaften liefern. In Abbildung 1 sind die wichtigsten Quellen und Senken des gelösten Sauerstoffs in Flusssystemen dargestellt.

In ihrem Review tragen die Autoren auf Basis umfangreicher Literaturrecherchen Erkenntnisse aus bisherigen Studien zusammen (1) zur vergleichsweise geringen und mit steigender Temperatur abnehmenden Löslichkeit von Sauerstoff in Süßwasser, (2) zu Sauerstoffgehalt und -umsätzen in Boden- und Grundwässern, (3) zu sauerstoffrelevanten Prozessen in hyporheischen Zonen – dem Mischungsbereich des Grund- und Flusswassers im Flussbett – sowie (4) zu Sauerstofftransfer und -transformationen in Flüssen, natürlichen Seen und Stauseen sowie Mündungsgebieten. Sie arbeiten heraus, dass die Sauerstoffdynamiken durchweg von komplexen und ineinandergreifenden biogeochemischen Abläufen geprägt sind. Großen Einfluss auf Sauerstoffgehalte und -dynamiken in Bächen und Flüssen haben dabei Wassertemperaturen, Lichtverhältnisse,

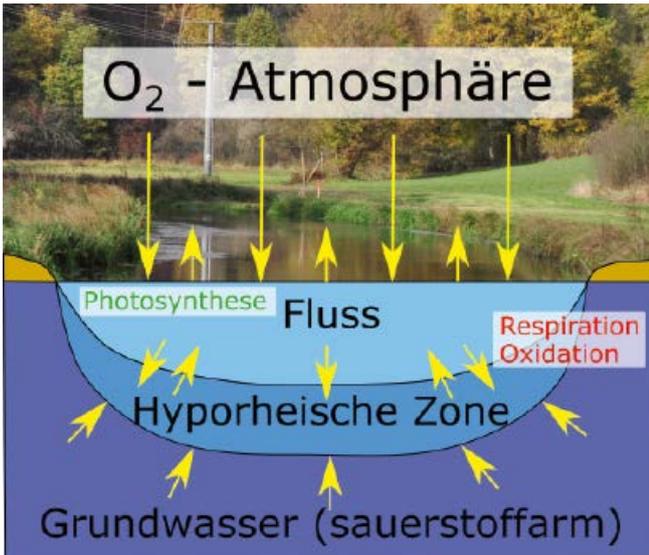


Abb. 1: Überblick über wesentlichen Quellen und Senken des gelösten Sauerstoffs in Flüssen mit der daran angebundene hyporheischen Zone und dem Grundwasser. Die wichtigsten Sauerstoffquellen sind Atmosphäre und Photosynthese, wohingegen Respiration organischer Substanz und Oxidation von Mineralen Sauerstoff verbrauchen. Die gelben Pfeile verdeutlichen den Austausch zwischen der Atmosphäre, dem Fluss, der hyporheischen Zone und dem Grundwasser.

Turbulenz-bedingte Gasaustauschraten mit der Atmosphäre und die zum Teil durch angrenzende Landnutzungen geprägte Nährstoffverhältnisse. Tagsüber können höhere Wassertemperaturen, Nährstoffkonzentrationen und Lichtintensitäten zu einer starken photosynthetischen Sauerstoffproduktion und zur Übersättigung führen. Daraus resultiert aber meist auch ein erhöhter biologischer Sauerstoffbedarf, der vor allem nachts eine starke Sauerstoffzehrung bewirken kann. Hier zeigte sich die Turbulenz der Fließgewässer als wichtiger physikalischer Faktor, der durch Austauschprozesse mit der Atmosphäre Schwankungen durch biologische Sauerstoffproduktion- und zehrung abmildern kann. Insbesondere die hyporheische Zone (d.h. das Flussbett mit Anbindung an das Grundwasser) ist für zahlreiche an und im Wasser lebende Arten ein wichtiger Lebensraum, in dem etliche Tiere das Ei- oder Larvenstadium verbringen. In dieser hyporheischen Zone kann die Mischung von meist sauerstoffreichem Flusswasser und sauerstoffarmem Grundwasser (siehe Abbildung 1) räumlich steile Sauerstoff-Gradienten bewirken. Rasch veränderliche Sedimentationsmuster und die Existenz reaktiver Metallhydroxide, wie etwa von Eisen oder Mangan, wirken sich dabei zusätzlich auf die Sauerstoffdynamik aus. Die hyporheische Zone als Rückzugsort benthischer Arten spielt eine Schlüsselrolle für Fließgewässer-Ökosysteme und kann leicht aus dem (Sauerstoff-)Gleichgewicht geraten.

**Statistik im großen Maßstab:
Erkenntnisse aus globalen Flusswasser-Messdaten**

Statistische Analysen von über 170 000 Messdaten des gelösten Sauerstoffs aus der Global River Chemistry (GloRich) Datenbank [2] beleuchten Zusammenhänge auf globalem Maßstab [1]. Wichtige Einflussfaktoren auf den gelösten Sauerstoff in

Bächen und Flüssen sind erwartungsgemäß wasserchemische Parameter wie die Nährstoffverfügbarkeit, aber auch der Einfluss der Topographie, der Anteil von Wald- oder Ackerflächen im Einzugsgebiet sowie die Bevölkerungsdichte. Zudem zeigte sich, dass trotz der Komplexität aller Sauerstoffproduzierenden und -umsetzenden Prozesse in Flüssen die Wassertemperatur eine der wichtigsten Einflussgrößen für die Sauerstoffkonzentration in Fließgewässern ist. Dies lässt befürchten, dass die Klimaerwärmung allein aufgrund der geringeren Sauerstofflöslichkeit in wärmeren Gewässern für aquatische Ökosysteme zum kritischen Faktor werden kann. Die Autorinnen und Autoren der Studie schlagen vor, das Monitoring von Flüssen – die als Umwelt-Integratoren ganzer Einzugsgebiete angesehen werden können – im Kontext des Klimawandels weiter zu verbessern (siehe Abbildung 2). Dies ist insbesondere bei Sanierungsmaßnahmen und Renaturierungsmaßnahmen, die oft ohne wissenschaftliche Begleitprogramme ablaufen, sehr wichtig [3, 4, 5]. Dazu kann die Konzentration des gelösten Sauerstoffs hochauflösend gemessen werden; möglich sind darüber hinaus Analysen zur Verweildauer sowie zu Quellen und Senken des Sauerstoffs und damit verbundener Parameter. Neuere methodische Werkzeuge, wie die Analyse der stabilen Isotope des gelösten Sauerstoffs sowie von Eisenumsetzungen, die Verwendung von Bioindikatoren wie Fisch-eiern und -larven und die Messung von im Wasser gelöstem Radongas können dazu beitragen, Umsetzungsprozesse und deren Effekte besser zu verstehen, zu prognostizieren und Frühwarnsysteme zu entwickeln. Diese Techniken werden aktuell in dem vom Bayerischen Wissenschaftsministerium finanzierten Verbundforschungsvorhaben AquaKlif weiterentwickelt (<https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/aquaklif/>).



Abb. 2: Wasserchemische Untersuchungen in Fließgewässern mit hohen anthropogenen Landnutzungsanteilen in direkter Umgebung, wie hier landwirtschaftliche Ackerflächen, sind essentiell, um deren Auswirkungen auf die Sauerstoff-Verfügbarkeit in Flüssen besser zu verstehen.

Den Weg des Sauerstoffs gezielt verfolgen: Stabile Isotope

Aleinige Untersuchungen von Konzentrationsänderungen des gelösten Sauerstoffs enthalten oft nicht ausreichend spezifische Aussagen über dessen Herkunft und Umsetzung. Mit Hilfe von speziellen Massenspektrometer-Techniken können daher zusätzlich stabile Isotopenverhältnisse des gelösten Sauerstoffs gemessen werden [6, 7]. Hierbei dienen Verschiebungen der $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ Verhältnisse als Indikatoren, die anzeigen, ob der gelöste Sauerstoff aus der Atmosphäre stammt oder durch Photosynthese von Wasserpflanzen und Algen produziert wurde. Aerobe, meist bakterielle Umsetzung – als Hauptverbraucher des Sauerstoffs – verursacht wiederum eigene typische Isotopenverhältnisse. Mit Hilfe von Modellen, die Sauerstoffkonzentrationen und deren stabile Isotope mit einbeziehen, können Verhältnisse und Raten der wichtigsten Sauerstoff-beeinflussenden Prozesse Photosynthese, Respiration und atmosphärischer Gasaustausch definiert werden [8, 9]. Dies ermöglicht eine bessere Einschätzung des aktuellen Zustands von Fließgewässern und räumlich-zeitlicher Entwicklungen von Sauerstoffbilanzen durch den Einfluss von Klimawandel und Landschaftsveränderungen im Einzugsgebiet. Durch Verknüpfung dieser Ergebnisse mit biologischen Daten können hiermit auch Empfehlungen für den Erhalt der Artenvielfalt abgeleitet werden.

Eine Herausforderung für die Probenahme ist es, diese Dynamiken nicht nur in frei fließenden Wässern, sondern auch in der hyporheischen Zone zu untersuchen. Durch spezielle Beprobungstechniken lässt sich der wenige Sauerstoff im oft trüben Sedimentporenwasser bis zu seiner Messung im Labor erhalten (siehe Abbildung 3). Durch kombinierte Beprobungen



Abb. 3: Beprobung der Sedimentwässer in den Fließrinnen für die Bestimmung der Konzentrationen und stabilen Isotope des gelösten Sauerstoffs (Standort Aquatische Systembiologie in Freising/TUM). Die vorsichtige Extraktion erfolgt unter Luftabschluss mit einer Spritze, die an eine spezielle Entnahmelanze gekoppelt ist (Foto: Luisa Daxeder).

in natürlichen Gewässern und Fließrinnenexperimenten, wie sie ebenfalls im Aquaklif-Projekt realisiert werden, lassen sich Einflüsse von Temperatur, Feinsedimenteintrag und verändertem Abfluss auf den gelösten Sauerstoff gezielt ermitteln. Bisherige Ergebnisse zeigen die komplexen Wirkgefüge von Verfügbarkeit und Umsatz des Sauerstoffs in Fließgewässern und in der hyporheischen Zone. Vor allem bisher wenig beachtete Sauerstoffquellen- oder -senken wie Gas-Diffusion oder Eisenoxidbildungen müssen noch besser charakterisiert werden, um beobachtete Sauerstoffumsetzungen und -gradienten in Flusssedimenten besser modellieren zu können.

Wenn das Grundwasser dominiert: Sauerstoffdynamik bei Niedrigwasser

Niedrigwasser als Folge des Klimawandels führt dazu, dass der Anteil an Grundwasser vor allem in den Oberläufen der Gewässer sehr hoch werden kann. Kaule & Gilfedder [10] konnten mit Hilfe des Tracers Radon zeigen, dass bei geringer Wasserführung der Grundwasser-Anteil in einem Oberlauf auf bis zu 70 % steigt. In Niedrigwassersituationen kann die Wasserqualität des einfließenden Grundwassers demnach erheblichen Einfluss auf die Wasserqualität von Fließgewässern haben. Häufig ist dieses Grundwasser reduzierend und beeinflusst den Sauerstoffgehalt eines Gewässers negativ – zusätzlich zur ge-



Abb. 4: Befüllen einer Probenflasche für die Radon-Tracer Methode, um Grundwasserzuflüsse quantifizieren zu können. Durch vollständiges Untertauchen der Probenflasche und den Verschluss unter Wasser kann eine Kontamination mit Luft ausgeschlossen werden.

ringeren Sauerstofflöslichkeit bei sommerlichem Niedrigwasser mit erhöhten Wassertemperaturen. Oberläufe machen einen großen Teil des weltweiten Fließgewässernetzes aus. Andererseits sind aquatische Ökosysteme in Oberläufen während Dürreperioden zunehmend von Grundwasserzuflüssen abhängig. Daher sollten diese Erkenntnisse für den Unterhalt und Schutz von Fließgewässern unter veränderten klimatischen und Landnutzungs-Bedingungen mit einbezogen werden.

Um die Situation an einem konkreten Fließgewässer zu beleuchten, kann die Radon-Tracer-Methode flexibel zur Quantifizierung und Kartierung des Grundwasserzuflusses genutzt werden (siehe Abbildung 4). Das natürlich vorkommende radioaktive Edelgas ist ein besonders empfindlicher Tracer. Die Technik basiert auf in der Regel hohen Radon-Konzentrationen im Grundwasserleiter. Radon wird lokal mit Gasdetektoren gemessen, aus den Daten werden mittels Massenbilanzierung Grundwasserzuflüsse entlang eines Fließgewässers berechnet [11].

Bedeutung von Eisenverbindungen für den Sauerstoff-Haushalt

Viele Grundwässer sind verglichen mit dem Oberflächenwasser neben geringerem Sauerstoffgehalt durch einen erhöhten Gehalt an reduzierten Eisen-Ionen (Fe(II)) gekennzeichnet, die für Lebewesen wie Fischlarven toxisch sein können. Die Dynamik von Sauerstoff-Eisen-Reaktionen in Gewässern ist im Gegensatz zu Stickstoffumsätzen vergleichsweise wenig untersucht. Dabei birgt das oxidative Ausfällen von Fe(III)hydroxiden – ein als rotbraune „Verockerung“ auch von Laien erkennbares Phänomen (siehe Abbildung 5) – die Gefahr, den ohnehin schon knappen Sauerstoff im Gewässer aufzubreuchen und für Wasseraustausch und Makrozoobenthos relevante Poren zu verstopfen. Insbesondere in Niedrigwasserphasen kann dadurch der Austausch des Freiwassers mit dem hyporheischen Interstitial vermindert werden und bei erhöhten Temperaturen den gewässerökologischen Zustand entscheidend verschlechtern. Im „Normalfall“ leisten durch wechselnde Wasserstände dynamisch zwischen oxisch und anoxisch schwankende biogeochemische Verhältnisse einen wichtigen Beitrag zur Selbstreinigungskraft von Gewässern [12]. Entscheidend sind dabei die variierenden Zustände sogenannter redoxaktiver Substanzen, zu denen Eisen und Sauerstoff als wichtigste Elemente gehören. Die Funktionen wassergeprägter Ökosysteme können durch hydrologische Schwankungen erheblich beeinflusst und verändert werden. Ein genaueres Verständnis der biogeochemischen Sauerstoff-Eisen-Umsätze ist ein wichtiger Schlüssel, um die Folgen des Klimawandels für den Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz sowie Schadstoffabbau und mögliche Treibhausgas-Emissionen in aquatischen Ökosystemen genauer abzuschätzen.

Summierter Sauerstoffmangel: Erste Erkenntnisse aus Fließbrinnen-Experimenten

Die Untersuchung der Abundanz bestimmter Zielorganismen ist ein bewährtes Mittel, um die Qualität eines Fließgewässers als Habitat für aquatische Lebensgemeinschaften zu bestimmen. Viele Gründe für das Verschwinden bestimmter Arten sind bereits bekannt. Hierzu zählt die verstärkte Ablagerung von Feinsedimenten und die Zusetzung (i.e. Kolmation) des



Abb. 5: Verockerung der Flusssedimente in einem bayerischen Oberlauf als Indiz für Ausfällungsprozesse reduzierter Eisenionen (Fe(II)) bei Vermischung von eisenreichem Grundwasser mit sauerstoffreichem Flusswasser.

Gewässergrundes, mit weitreichenden Folgen für kieslaichende Fische und anderen Lebewesen [13, 14, 15]. Weitere Faktoren sind steigende Temperaturen und sinkende Sauerstoffgehalte und -einträge. Im Freiland sind Einflüsse einzelner Stress-

Multiparameter Sonde

CTD75M
Speicherprobe

Temperatur,
Leitfähigkeit,
Druck, Salzgehalt,
gelöster Sauerstoff,
pH, Trübung,
Chlorophyll A

Entwickelt für die Limnologie

#sea-sun-tech.com

Sea & Sun Technology GmbH

+49 4323 91 09 13 sales@sea-sun-tech.com

KW Korrespondenz Wasserwirtschaft

Organ der DWA –
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Herausgeber und Verlag:

GFA
Theodor-Heuss-Allee 17, D-53773 Hennef
Postfach 11 65, D-53758 Hennef
Telefon +49 2242 872-0, Telefax +49 2242 872-151
Internet: www.gfa-news.de

Redaktionsbeirat:

1. Prof. Dr. Uli Paetzel, DWA-Präsident
2. Prof. Dr. Robert Jü pner, Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA
3. Dipl.-Ing. Rainer Kö ne mann, DWA-HA „Kreislaufwirtschaft, Energie und Klärschlamm“
4. Rechtsanwalt Stefan Kopp-Asse nmacher, DWA-HA „Recht“
5. Bauass. Dipl.-Ing. Johannes Lo ha us, Sprecher der DWA-Bundesgeschäftsführung
6. Prof. Dr.-Ing. Hubertus Mil ke, DWA-Vorstand
7. Dr.-Ing. habil. Uwe Mü ller, DWA-HA „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“
8. Prof. Dr.-Ing. André Ni e mann, DWA-HA „Bildung und Internationale Zusammenarbeit“
9. Dr.-Ing. Frank Ob e n a u s, DWA-HA „Kommunale Abwasserbehandlung“
10. Prof. Dr.-Ing. Johannes Pi n n e k a m p, DWA-HA „Entwässerungssysteme“
11. Dr. Andrea Po p p e, DWA-HA „Industrieabwässer und anlagenbezogener Gewässerschutz“
12. Rolf U s a d e l, GFA-Vorstand
13. Prof. Dr.-Ing. Silke Wi e p r e c h t, DWA-HA „Wasserbau und Wasserkraft“
14. Ass. jur. Georg W u l f, DWA-HA „Wirtschaft“
15. Dr. Jörg Z a u s i g, DWA-HA „Gewässer und Boden“

Redaktion:

Dipl.-Volksw. Stefan Bröker (v. i. S. d. P.), Tel. +49 2242 872-105,
E-Mail: broeker@dwa.de
Dr. Frank Bringewski (ChR), Tel. +49 2242 872-190,
E-Mail: bringewski@dwa.de

Anzeigen:

Monika Kramer, Tel. +49 2242 872-130, E-Mail: anzeigen@dwa.de
Christian Lange, Tel. +49 2242 872-129, E-Mail: lange@dwa.de

Sekretariat:

Bianca Jakubowski, Tel. +49 2242 872-138
E-Mail: jakubowski@dwa.de

Erscheinungsweise:

Zurzeit gilt Anzeigenpreisliste Nr. 9
vom 01. Januar 2022

Satz: in puncto:asmuth druck + medien gmbh, Bonn

Druck, Bindung: DCM Druck Center Meckenheim GmbH, Meckenheim

Bezugspreis: Der Verkaufspreis ist durch den DWA-Mitgliedsbeitrag abgegolten. DWA-Mitglieder, die Mehrexemplare der KW erwerben möchten oder die sich für die Zeitschrift *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* als kostenlose Mitgliederzeitschrift entschieden haben, können die KW zusätzlich für 69,50 Euro zzgl. Versandkosten bestellen, online 45,00 Euro.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Von einzelnen Beiträgen oder Teilen von ihnen dürfen nur einzelne Vervielfältigungsstücke für den persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch hergestellt werden. Die Weitergabe von Vervielfältigungen, gleichgültig zu welchem Zweck sie hergestellt werden, ist eine Urheberrechtsverletzung. – Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung. Insbesondere unterliegen die Angaben in Industrie- und Produktberichten nicht der Verantwortung der Redaktion.

Richtlinien zur Abfassung von Manuskripten können beim Redaktionssekretariat angefordert werden.

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier mit Recyclingfasern.

© GFA
D-53773 Hennef

ISSN 1865-9926



Abb. 6: Aufbau der Fließrinnenexperimente mit Grob- und Feinsedimenten sowie variablen Temperaturen und Flussraten in Freising, Lehrstuhl Aquatische Systembiologie/TUM (Foto: Johannes Barth).

faktoren sowie ihre kombinierte Wirkung auf die Entwicklung von Arten oft schwierig zu bestimmen. Dies leistet im Rahmen des AquaKlif-Projekts ein groß angelegtes Fließrinnenexperiment in Freising, in dem in 24 künstlich angelegten Rinnen die einzelnen und summierten Einflüsse von erhöhter Temperatur, vermindertem Abfluss, sowie erhöhtem Feinsedimentanteil im Bachbett auf die Entwicklung von Fischeiern und -larven sehr gezielt untersucht wird (siehe Abbildung 6). Erste Ergebnisse zeigen, dass zum Beispiel die Eientwicklung und der Schlupferfolg von Fischlarven des Huchens (*Hucho hucho*) und der Bachforelle (*Salmo trutta*) unter Einfluss von Feinsedimenten und erhöhten Temperaturen negativ beeinträchtigt wird. Beide Faktoren verstärken sich gegenseitig und führen mitunter zum vollständigen Absterben der Larven. Der Grund dafür ist die bei erhöhten Temperaturen und Feinsedimentgehalten stark verringerte Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Substrat. Diese wirkt sich zudem auch negativ auf mikrobiologische Prozesse des Laubabbaus und auf die Besiedelung mit Insektenlarven aus, die ihrerseits als Bioindikatoren und als wichtige Fischnährtiere dienen.

Fazit und Ausblick

Kontinuierlich und in ausreichender Menge vorhandener gelöster Sauerstoff ist für die meisten Gewässerorganismen lebenswichtig. Das Zusammenspiel aus menschlicher Landnutzung und Klimaerwärmung kann sich dabei durch seine Auswirkungen, wie veränderte hydrologische Bedingungen, höhere Wassertemperaturen und Sediment- und Nährstoffeinträge, negativ auf die Sauerstoffverfügbarkeit und -dynamik in Flusssystemen auswirken. Dies zeigte sich sowohl in den Untersuchungsergebnissen kleinräumiger Detailstudien, als auch in statistischen Analysen globaler Messdaten zu gelöstem Sauerstoff in Flüssen.

Es lohnt sich, diesem altbekannten Indikatorwert für Wasserqualität besonders in Zeiten des Klimawandels erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen: gerade in Bächen und Flüssen ist der gelöste Sauerstoff ein idealer dynamischer und integraler Parameter, der neben dem Zustand des Fließgewässers auch die Gesamtsituation im Einzugsgebiet mit charakterisiert. Mit Hilfe neuer Erkenntnisse zur Rolle des Sauerstoffs in Fließgewässern lassen sich zum einen „Frühwarnsysteme“ entwickeln, um mit geeigneten Maßnahmen einer von Klima und Menschen bedingten Sauerstoffverknappung rechtzeitig entgegenzuwirken. Zum anderen bietet gerade die Kombination der hier beschriebenen methodischen Ansätze die Möglichkeit, die komplexen biogeochemischen Prozesse in Fließgewässern weiter aufzuklären. Dabei verdient insbesondere die physikochemisch bedingte geringere Löslichkeit des Sauerstoffs bei zukünftig höheren Wassertemperaturen in unseren temperaten Klimazonen Beachtung.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Verbundprojekts AquaKlif, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst im Bayerischen Klimaforschungsnetzwerk (bayklif). Das Projekt leistet Beiträge für ein adäquates Management von Fließgewässern in Anpassung an den Klimawandel. Neben den oben beschriebenen Ansätzen werden Waldquellen als Klimaindikationssysteme, die Rolle von Niedermooren auf Abflüsse sowie Szenarienrechnungen zu gewässer-schonenden Anbaumethoden analysiert. Mehr zum Projekt unter: <https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/aquaklif/>

Literatur

[1] D. R. Piatka, R. Wild, J. Hartmann, R. Kaule, L. Kaule, B. Gilfedder, S. Peiffer, J. Geist, C. Beierkuhnlein, J. A. C. Barth: *Transfer and transformations of oxygen in rivers as catchment reflectors of continental landscapes: A review*, Earth-Science Reviews 220, 2021, 103729.

[2] J. Hartmann, R. Lauerwald, N. Moosdorf: *A Brief Overview of the GLObal River Chemistry Database, GLORICH*, Procedia Earth and Planetary Science 10, 2014, S. 23–27.

[3] J. Geist, S. J. Hawkins: *Habitat recovery and restoration in aquatic ecosystems: Current progress and future challenges*, Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 26 (5), 2016, S. 942–962.

[4] J. Geist: *Seven steps towards improving freshwater conservation*, Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 25 (4), 2015, S. 447–453.

[5] J. Pander, J. Geist: *Ecological indicators for stream restoration success*, Ecological Indicators 30, 2013, S. 106–118.

[6] J. A. C. Barth, A. Tait, M. Bolshaw: *Automated analyses of 18O/16O ratios in dissolved oxygen from 12-mL water samples*, Limnology and Oceanography: Methods 2 (2), 2004, S. 35–41.

[7] M. Mader, C. Schmidt, R. van Geldern, J. A. C. Barth: *Dissolved oxygen in water and its stable isotope effects: A review*, Chemical Geology 473, 2017, S. 10–21.

[8] J. J. Venkiteswaran, L. I. Wassenaar, S. L. Schiff: *Dynamics of dissolved oxygen isotopic ratios: a transient model to quantify primary production, community respiration, and air-water exchange in aquatic ecosystems*, Oecologia 153 (2), 2007, S. 385–398.

[9] J. J. Venkiteswaran, S. L. Schiff, L. I. Wassenaar: *Aquatic metabolism and ecosystem health assessment using dissolved O-2 stable isotope diel curves*, Ecological Applications 18 (4), 2008, S. 965–982.

[10] R. Kaule, B. Gilfedder: *Groundwater Dominates Water Fluxes in a Headwater Catchment During Drought*, Frontiers in Water 3 (89), 2021.

[11] S. Frei, B. S. Gilfedder: *FINIFLUX: An implicit finite element model for quantification of groundwater fluxes and hyporheic exchange in streams and rivers using radon*, Water Resources Research 51 (8), 2015, S. 6776–6786.

[12] S. Peiffer, A. Kappler, S. B. Haderlein, C. Schmidt, J. M. Byrne, S. Kleindienst, C. Vogt, H. H. Richnow, M. Obst, L. T. Angenent, C. Bryce, C. McCammon, B. Planer-Friedrich: *A biogeochemical–hydrological framework for the role of redox-active compounds in aquatic systems*, Nature Geoscience 14, 2021, S. 264–272.

[13] A. Duerregger, J. Pander, M. Palt, M. Mueller, C. Nagel, J. Geist: *The importance of stream interstitial conditions for the early-life-stage development of the European nase (Chondrostoma nasus L.)*, Ecology of Freshwater Fish 27 (4), 2018, S. 920–932.

[14] K. Sterneckner, D. Cowley, J. Geist: *Factors influencing the success of salmonid egg development in river substratum*, Ecology of Freshwater Fish 22 (2), 2013, S. 322–333.

[15] J. Geist, K. Auerswald: *Physicochemical stream bed characteristics and recruitment of the freshwater pearl mussel (Margaritifera margaritifera)*, Freshwater Biology 52 (12), 2007, S. 2299–2316.

Autorinnen und Autoren

Dr. David Piatka* und Prof. Johannes Barth, PhD
 Lehrstuhl für Angewandte Geologie,
 GeoZentrum Nordbayern,
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
 Schlossgarten 5
 91054 Erlangen

*derzeitige Adresse:
 Institut für Meteorologie und Klimaforschung Atmosphärische
 Umweltforschung (IMK-IFU),
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Kreuzeckbahnstraße 19
 82467 Garmisch-Partenkirchen

E-Mail: d_piatka@yahoo.de

Romy Wild, M. Sc. und Prof. Dr. Jürgen Geist
 Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie,
 Technische Universität München (TUM)
 Mühlenweg 22
 85354 Freising

Robin Kaule M. Sc. und Dr. Benjamin Gilfedder
 Limnologische Forschungsstation, BayCEER, UBT

Lisa Kaule M. Sc. und Prof. Dr. Stefan Peiffer
 Lehrstuhl für Hydrologie, BayCEER, UBT

Dr. Birgit Thies
 Geschäftsstelle BayCEER, UBT
 Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung
 (BayCEER)
 Universität Bayreuth (UBT)
 Universitätsstraße 30
 95447 Bayreuth

