

This is the accepted manuscript version of the contribution published as:

Rinke, K. (2024):

Klimaanpassungen im Wasserqualitätsmanagement unserer Trinkwassertalsperren:

Forschungsergebnisse und Synergien zwischen Praxis und Forschung

Energie-, Wasser-Praxis **75** (9), 66 - 73

The publisher's version is available at:

<https://energie-wasser-praxis.de/ausgabe-09-2024/>

Wissens-basiertes Wassergütemanagement zur Klimaanpassung unserer Trinkwassertalsperren

Alternativ:

Klimaanpassungen im Wasserqualitätsmanagement unserer Trinkwassertalsperren: Forschungsergebnisse und Synergien zwischen Praxis und Forschung.

Abstract

Der Klimawandel erfordert nicht nur Anpassungen im Talsperrenmanagement im Sinne der Mengenbewirtschaftung, z.B. zur Bewältigung von Dürre und Hochwasser, sondern auch hinsichtlich der Wassergüte. Denn Prognosen zeigen tiefgreifende Veränderungen der Ökosysteme, z.B. abnehmende Sauerstoffkonzentration, intensiveres Algenwachstum und Dominanz von Cyanobakterien. Bei Einhaltung der Pariser Klimaziele werden diese negativen Entwicklungen weitestgehend vermieden, aber bei fortschreitendem Klimawandel sind Anpassungen notwendig. Talsperren bieten vielfältige Managementoptionen, die diese negativen Auswirkungen des Klimawandels abpuffern können. Aber auch Anforderungen an das Monitoring, die Entwicklung von Frühwarnsystemen und die Definition angepasster Bewirtschaftungsziele erfordern weitere gemeinsame Anstrengungen von Forschung und Praxis.

Einleitung

Mit fortschreitender Klimaerwärmung erwarten Deutschland nicht nur höhere mittlere Temperaturen, sondern auch zunehmendes Auftreten von Extremereignissen in Form von Hitzewellen, Dürren und Hochwasserereignissen. Diese Entwicklungen sind nicht mehr lediglich Zukunftsprognosen sondern deutlich spürbare und umfänglich realisierte Veränderungen in unserer Umwelt, die sich in statistisch signifikanten Temperaturtrends (Brasseur et al., 2016) und zunehmenden Extremereignissen (Coumou & Rahmstorf, 2012) niederschlagen. Es liegt auf der Hand, dass diese klimatischen Veränderungen den Wassersektor stark beeinflussen, insbesondere erhöhen sie den Bedarf an Wasserspeicherung, um einerseits die Intensität von Hochwasserereignissen abzumildern und andererseits zusätzliches Wasser zur Überbrückung von Dürreperioden vorzuhalten. Neben der Bewirtschaftung des Grund- und Landschaftswasserhaushaltes spielen auch Talsperren deshalb eine wichtige Rolle in der Anpassung an den Klimawandel, insbesondere hinsichtlich der Wassermengenbewirtschaftung.

Gleichzeitig verändert der Klimawandel aber auch die Beschaffenheit der Wasserkörper unserer Talsperren und Seen und die Beobachtungen der vergangenen Jahre offenbaren starke negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserbeschaffenheit und Ökosystemzustände. Dies äußert sich beispielsweise in zunehmenden Eutrophierungstendenzen, die sich durch abnehmende Sauerstoffkonzentrationen, stärkeres Algenwachstum und höhere Produktivität bis hin zu Blaualgen-

Massenentwicklungen niederschlagen (Meerhoff et al., 2022). Bezüglich der Wasserqualität kehrt sich deshalb die Rolle der Talsperren im Klimawandel um. Während im Kontext des Wassermengenmanagements die Talsperren eine signifikante Rolle in der Klimaanpassung spielen, sind hinsichtlich der Wasserqualität die Talsperren erheblichen Verschlechterungen ausgesetzt und bisherige Dienstleistungen stehen zunehmend in Frage sodass die bestehenden Konzepte in der Wasserqualitätsbewirtschaftung an den Klimawandel angepasst werden müssen. Ganz besonders äußert sich dies in Dienstleistungen der Talsperren, die höchste Anforderungen an die Wasserqualität stellen. Dies ist allem voran die Trinkwasserbereitstellung aus Talsperren, die in Deutschland im Mittelgebirgsgürtel vom Erzgebirge über den Harz und Thüringer Wald bis in den nordrheinischen Raum eine große Rolle in der Wasserversorgung einnimmt.

Die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturverhältnisse unserer Talsperren und auch mögliche Anpassungsstrategien zur Dämpfung dieser Temperaturveränderungen wurden bereits in Rinke et al (2021, 2023) dargestellt. Demnach müssen wir mit erheblichen Temperaturzunahmen in den Oberflächenschichten bis zu 4-6 K je nach Klimaszenario betragen, und mit verlängerten sommerlichen Schichtungsdauern um 1-2 Monaten rechnen. Eine Erwärmung des Tiefenwassers kann aber durch eine Umstellung der Wildbettgabe aus dem Epilimnion anstelle einer Abgabe aus dem Hypolimnions verhindert werden. Diese bestehenden Arbeiten fokussieren aber vor allem auf die Auswirkungen auf die Temperaturverhältnisse und die physikalische Struktur, gehen aber kaum auf ökosystemare Komponenten wie Sauerstoffhaushalt oder Phytoplanktodynamik ein. Dieser Beitrag fokussiert deshalb auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemdynamik unserer Gewässer und beleuchtet hierbei aktuelle Fortschritte in der Modellierung und Klimafolgen-Prognose sowie die Synergien zwischen Forschung und Praxis in der Entwicklung von Anpassungsstrategien sowie den aktuellen Forschungsbedarf.

Stand der Forschung: Klima-bedingte Entwicklungen, Talsperrenmodellierung und Prognosen der Wasserqualität

Standgewässer und ihre Ökosysteme reagieren empfindlich auf Klimaveränderungen. Bereits heute sind Auswirkungen des Klimawandels statistisch signifikant darstellbar, die betrifft vor allem Seen, die weitaus besser untersucht sind als Talsperren. Die zur Verfügung stehende Literatur ist umfangreich und kann durch folgende Aufzählung komprimiert zusammengefasst werden:

- Zunahme der Produktivität durch verlängerte Vegetationsperiode und höhere Temperaturen sowie verstärkte interne und externe Nährstoffbelastung durch Rücklösung und Mineralisierung (Moss et al., 2011)
- Vermehrtes Auftreten von „Cyanobakterien- und Algenblüten“ durch höhere Temperaturen und Nährstoffverhältnisse (Kosten et al., 2012; Ho et al., 2019)
- Veränderungen im Sauerstoffhaushalt in Form von zunehmender Anoxie im Tiefenwasser durch längere Stratifikationszeiten, erhöhte Temperatur und steigende Produktivität (Nkwale et al., 2024)
- Schnelle Ökosystemveränderungen durch selbst-verstärkende interne Mechanismen, z.B. in Form einer Kaskade: Sauerstoffabnahme im Tiefenwasser → verstärkte Nährstofffreisetzung → erhöhtes Algenwachstum → höherer Sauerstoffbedarf (North et al., 2014; Lewis et al., 2024).

Dieser umfangreichen Dokumentation der bereits realisierten Veränderungen in Seeökosystemen steht eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Studien gegenüber, die entsprechende Klimaprognosen der Wasserqualität auf großer Skala (kontinental, global) bereitstellen. Klimaprognosen für Seen sind darüber hinaus vor allen für die Auswirkungen auf die Wassertemperaturen und

Schichtungsverhältnisse beschränkt (Woolway et al., 2020) und sagen konsistent voraus, dass sich die Dauer der Schichtung erhöht, Wassertemperaturen steigen und Eisbedeckung abnimmt. Bisher dimiktische Gewässer (Durchmischung im Herbst und Frühjahr), werden damit in monomiktische überführt (Durchmischung nur im Winter) und die Dauer der Temperaturschichtung verlängert sich bei pessimistischen Klimaszenarien (Erwärmung um 5-6K) um bis zu 2 Monate (Mi et al., 2020b).

Tieferegreifende Prognosen für Ökosystemkomponenten wie z.B. Nährstoffe, Plankton oder Primärproduktion existieren aber nur für einzelne Gewässer und ein kleiner Teil dieser Gewässerspezifischen Studien adressieren Trinkwassertalsperren. In Deutschland ist diesbezüglich die Rappbodetalsperre (Abb. 1), Deutschlands größte Trinkwassertalsperre, verhältnismäßig gut untersucht, denn für dieses Gewässer liegen ausgezeichnete Wassergütedaten sowie ein angepasstes und validiertes Talsperrenmodell vor. Diese Modell ist ein gekoppeltes hydrophysikalisch-ökologisches 2D Modell (CEQUAL-W2, siehe <http://www.ce.pdx.edu/w2/>), welches für die Simulation von Talsperren gut geeignet ist weil es die longitudinalen und vertikalen Gradienten sehr gut wiedergeben kann. Die Anwendung an der Rappbode-Talsperre zeigt, dass das Modell sowohl physikalische und chemische Messgrößen in guter Übereinstimmung mit Messdaten simulieren kann (Abb. 2). Auch Ökosystemkomponenten wie verschiedene Algengruppen sind hinsichtlich des zeitlichen Auftretens, der Tiefenverteilung und der Gesamtbiomasse im Modell gut abgebildet (Abb. 3). Hierbei ist hervorzuheben, dass das ökologische Modell nicht nur die allgemeine Produktivität und Algenbiomasse wiedergibt, sondern auch die Konkurrenz zwischen den dominanten Algengruppen in der Talsperre, Diatomeen und Cyanobakterien, darstellen kann. Die Modellgüte, z.B. gemessen als Bestimmtheitsmass oder verschiedene Fehlerindices, ist sehr hoch und repräsentiert im internationalen Vergleich einen exzellenten Standard (Tab. 1). Für das Modell kann deshalb eine gewisse Prognosefähigkeit im Rahmen von Klimaszenarien vorausgesetzt werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Modells siehe Mi et al. (2020a).

Ein Anwendung des Modells auf verschiedene Klimaszenarien, die aus dem ISIMIP-Projekt bereitgestellt werden und somit über eine standardisierte Bias-Korrektur und einheitliche räumliche und zeitliche Auflösung verfügen (siehe www.isimip.org), zeigt große Unterschiede. Bei einer optimistischen Entwicklung unter Einhaltung der Pariser Klimaziele (Erwärmung im Bereich 1.5 bis 2K, Szenario RCP2.6) bleiben Veränderungen der Wasserqualität marginal. Bei pessimistischer Entwicklung des Klimas (Erwärmung im Bereich 5-6K, Szenario RCP8.5) finden umwälzende Veränderungen im Ökosystem statt. Eine wichtige Komponente hierbei ist eine fortschreitende Erwärmung des Tiefenwassers in der Talsperre von bisher ca. 5°C auf 7-8°C im Szenario RCP8.5, die im optimistischeren Szenario ausbleibt (Details zu den Temperaturänderungen sind bereits in Mi et al. (2020b) und in Rinke et al. (2021) publiziert und hier nicht weiter ausgeführt). Diese starke Veränderung der thermischen Struktur und auch eine um 60 Tage längere Schichtungsdauer induzieren im Szenario RCP8.5 starke Auswirkungen auf die Sauerstoff-, Nährstoff- und Phytoplanktondynamik. Sehr sensitiv reagiert dabei der Sauerstoff, der sowohl im Hypolimnion, als auch im metalimnischen Sauerstoffminimum deutlich abnimmt (Abb. 4A-D) und gegen Ende des Jahrhunderts Konzentrationsbereiche erreicht in denen Manganrücklösung eintritt (üblicherweise bei Unterschreitung von 1-2 mg/l Sauerstoff, Johnson et al., 1991). Hierbei ist zu beachten, dass für das Hypolimnion in Abb. 4 der Mittelwert für Tiefen>35m dargestellt ist und sich die tiefen, Sedimentnahen Bereiche des Hypolimnion bereits im anoxischen Zustand befinden während der Mittelwert noch deutlich über 0 mg l⁻¹ Sauerstoff liegt. Da die deutsche Trinkwasserverordnung einen Grenzwert von lediglich 0.05 mg l⁻¹ für gelöstes Mangan vorschreibt, ist eine Manganfreisetzung aus dem Sediment für die Trinkwassergewinnung problematisch und erfordert eine zusätzliche oxidative Behandlungsstufe.

Die Veränderungen der physikalischen Struktur, die Erwärmung und die längere Schichtungsperiode verändern natürlich auch die Ökosystemdynamik, die nicht nur durch eine verlängerte Vegetationsperiode, sondern auch durch höhere Mineralisierung und damit ein höheres Nährstoffrecycling beeinflusst wird. Während im optimistischen Szenario RCP2.6 der Ablauf der Phytoplanktodynamik nahezu gleichbleibt, kommt es bei starker Klimaerwärmung im Szenario RCP8.5 zu tiefgreifenden Veränderungen der Planktonsuccession (Abb. 5):

- Früheres Einsetzen der Diatomeenentwicklung im Frühjahr um rund 50 Tage
- Entstehung eines zusätzlichen Diatomeen-Peaks im späten Herbst (November)
- Persistenz der Cyanobakterie *Planktothrix rubescens* im Winter
- Fast ganzjährige Dominanz der Cyanobakterie *Planktothrix rubescens* bezüglich der Gesamtalgenmenge anstelle der bisher dominierenden Diatomeen

In den Lehrbüchern der Limnologie wird der Winter bisher als Ruheperiode charakterisiert, in der Abbauprozesse dominieren und Algenproduktion nur in begrenztem Umfang möglich ist. Diese grundsätzliche Charakteristik verschwindet im Laufe unseres Jahrhunderts bei fortschreitender intensiver Erwärmung. Die Standgewässer in Deutschland konvertieren dann zu einem jahreszeitlichen Verlauf, den wir derzeit von subtropischen oder mediterranen Gewässern kennen und in denen während des Winters Primärproduktion und Algenwachstum stattfindet (z.B.: See Genezareth). In diesen Gewässern spielt das Recycling der Nährstoffe eine wichtigere Rolle, weil die Mineralisierung Temperatur-bedingt beschleunigt abläuft. Die zunehmende Rolle von Cyanobakterien ist hierbei eine wichtige Komponente, denn die Zellen können durch Gasvakuolen in der Wassersäule verbleiben und sedimentieren kaum, sodass der übliche Weg der biologischen Nährstoffretention – die Sedimentation von Algen und Detritus – nicht mehr effektiv ablaufen kann.

Für die Wasserversorgung sind diese Veränderungen im Winter besonders relevant, denn in dieser Jahreszeit liegt ein durchmischter Wasserkörper vor und die suspendierten Algen werden im Rohwasser mit erfasst. Bisher ist dies bei der Rappbodetalsperre nicht der Fall, denn *P. rubescens* kommt gegenwärtig nur im Sommer vor, wenn die Talsperre geschichtet ist, und bleibt auf das Metalimnion beschränkt (Abb. 3). Zu dieser Zeit wird aber das Rohwasser aus dem tiefen Hypolimnion entnommen, wo die Cyanobakterien nicht vorkommen. Diese Barriere existiert aber in der Zukunft nicht mehr und es wird wahrscheinlicher, dass *P. rubescens* im Rohwasser in nennenswerter Konzentration vorliegen wird.

Für die wasserwirtschaftliche Praxis ist die Interpretation wissenschaftlicher Prognosen nicht trivial, denn man weiß erst hinterher, ob sie zutrafen oder nicht. Gleichzeitig ist eine ernst gemeinte Reaktion oft mit hohen Investitionen verbunden, die schwer zu legitimieren sind, sollten sich die Prognosen als falsch herausstellen. Hierbei ist es oft hilfreich, zusätzliche Indizien hinzuzuziehen. Im Kontext dieser Prognosen ist z.B. festzustellen, dass die statistischen Analysen der bisherigen Veränderungen auf der Basis realer Messdaten im Grunde dieselben Trends bestätigen (z.B. hinsichtlich Sauerstoff, Cyanobakterien, ...). Außerdem bieten Extremereignisse einen Blick in die Zukunft. Im Hitze- und Dürrejahr 2019 kam es z.B. in der Tat zu einer späten, herbstlichen Dominanz von Cyanobakterien in der Rappbodetalsperre und einer stärkeren Persistenz derselben während des darauffolgendem milden Winters.

Anpassungsoptionen im Talsperrenmanagement und Synergien zwischen Forschung und Praxis

Eine Talsperre ist ein sehr vielseitig bewirtschaftbares System und bietet Steuermöglichkeiten, über die ein natürlicher See nicht verfügt. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Entnahme des Wassers aus

verschiedenen Tiefen. Während der natürliche See den Ablauf immer oberflächennah hat, kann bei der Talsperre aus verschiedenen Bereichen Wasser entnommen werden. Hierbei wird das Rohwasser zur Trinkwassergewinnung aus gutem Grund aus dem Hypolimnion entnommen, denn das Wasser dort ist kalt und weniger mit Partikeln oder Bakterien belastet. Aber die Abgabe an den Unterlauf (Wildbettafgabe) kann flexibel gestaltet werden und dafür genutzt werden, „unerwünschtes Wasser“ zu entfernen. Hierdurch können z.B. Sauerstoff- arme oder Blaualgen-belastete Wasserschichten abgegeben werden und damit die Risiken von Güteverschlechterungen vermieden werden. Durch die Ableitung aus dem warmen Epilimnion erfolgt dabei auch immer ein Export von Wärme und im Betrieb der Rappbodetalsperre lässt sich dadurch eine Aufwärmung des Tiefenwassers sogar bei dem pessimistischen Szenario RCP8.5 vermeiden (Rinke et al., 2023).

Unsere Modellsimulationen zeigen, dass auch Variablen wie Sauerstoff, Nährstoffe und Algen hierdurch stark beeinflusst werden. Bei einem tiefenselektiven Betriebs der Wildbettafgabe, z.B. durch schwenkbare Entnahmeinfrastrukturen lässt sich gezielt sauerstoffarmes Wasser aus dem Metalimnion entfernen und damit das Eintreten von Anoxie im Metalimnion selbst bei starker Klimaerwärmung (RCP8.5) vermeiden (Abb. 4E). Auch die Entwicklung der Cyanobakterie *P. rubescens* lässt sich deutlich begrenzen durch eine gezielte Entnahme aus der entsprechenden Wasserschicht und die hohen Biomassen der Cyanobakterien im Winter können vermieden werden (Abb. 5E & F). Simulationen zur Identifikation der optimalen Entnahmetiefe und des wirksamsten Zeitfensters zeigen, dass die Wirkung der selektiven Entnahme nicht nur auf die Entfernung der Biomasse der Cyanobakterien beruht, sondern auch durch den Export von Nährstoffen aus den Gewässerzonen mit intensivem Nährstoffrecycling (Mi et al., 2022) sodass das Wachstumspotential für die Cyanobakterie begrenzt wird.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass der Betrieb der Talsperre einen erheblichen Einfluss auf die Ökosystemdynamik hat und hierdurch wirksame Instrumente zur Klimaanpassung generiert werden können. Generell folgt diese Managementstrategie der Umkehrung des „Aschenputtel-prinzips“ und somit dem Motto „das Gute ins Kröpfchen und das Schlechte in Töpfchen“ – d.h. qualitativ hochwertiges Wasser wird im Gewässer behalten während das minderwertige Wasser abgegeben wird. Das gleiche Prinzip lässt sich selbstverständlich auch für den Talsperrenzufluss anwenden sofern entsprechende Infrastrukturen wie Bypass-Lösungen oder Wasserüberleitungen vorhanden sind. Ein Beispiel bietet auch hier das System der Rappbodetalsperre, das erhebliche Wassermengen per Überleitung aus dem benachbarten Einzugsgebiet der Bode über die Talsperre Königshütte erhält. Bei einer optimierten, Wassergüte-getriebenen Steuerung der Überleitung lassen sich z.B. die DOC-Importfrachten in die Trinkwassertalsperre um 25% vermindern (Zhan et al., 2022). Diese Steuermöglichkeiten von Talsperren, die in natürlichen Seen nicht existieren, sind einerseits sehr wirksame hinsichtlich der Wassergütesteuerung, haben aber auch Konsequenzen auf die Wassermenge. Wird Zuflusswasser mit geringer Qualität abgeschlagen, steht es der Stauraumbewirtschaftung nicht zur Verfügung. Wenn eine metalimnische Cyanobakterienpopulation entfernt werden soll, muss das Wasser der entsprechenden Lamelle aus dem Stauraum entfernt werden. In dem Beispiel der Rappbodetalsperre erfordert die Kontrolle von *P. rubescens* ungefähr 10 Mio m³, was für die Rappbodetalsperre durchaus eine relevante Wassermenge darstellt, insbesondere in Dürreperioden. Ein vorteilhafter Betrieb erfordert daher eine gute Integration von Wassermengen- und Wassergütesteuerung.

Dieses selektive Zulauf- und Ablauf-Management stellt daher auch erhöhte Anforderungen an den Betreiber der Talsperre. Zunächst müssen die infrastrukturellen Erfordernisse etabliert werden, was mit sehr hohen und langfristigen Investitionen verknüpft ist. Lange Planungshorizonte erfordern ein rechtzeitigen Planungsbeginn. Diese Randbedingungen gelten auch für andere baulichen Maßnahmen zur Klimaanpassung wie z.B. Mauererhöhungen oder Investitionen in die

Trinkwasseraufbereitung (siehe Rinke et al., 2023, für eine Übersicht über potentielle bauliche Maßnahmen). Gleichzeitig müssen auch Leitlinien für den Betrieb der Infrastrukturen bereitgestellt werden, die sich in das vorhandene Wassermengen und Wassergütemanagement der Anlage integrieren (siehe oben). Hier sind Modellwerkzeuge sehr hilfreich, um die Konzepte an zukünftigen hydrometeorologischen Randbedingungen testen zu können und um die Möglichkeiten und Grenzen der Maßnahmen zu identifizieren. Schließlich werden Zustandsinformationen benötigt, die ein entsprechend aufgewertetes Monitoring erfordern. Hier sind nahe-Echtzeit-Monitoringsysteme in der Regel erforderlich, die sowohl die Wassermengen- als auch die Wasserqualitätsvariablen abdecken. Die Sensorik und Regeltechnik hierfür ist vorhanden und der Einsatz in Trinkwassertalsperren erprobt (Seipel et al., 2023). Auch für die Erfolgskontrolle der Maßnahmen ist ein gezieltes und langfristiges Monitoring notwendig, auch zur Identifikation langfristiger Trends ist ein langfristig ausgerichtetes Monitoring notwendig.

Durch enge Verzahnung von Forschung und Praxis können gerade bei den Anwendungsfeldern Talsperrenmodelle, Klimaprognosen, Monitoringsysteme und Bewirtschaftungsstrategien große Synergien erreicht werden. Dies ist nicht nur im Sinne einer Klima-angepassten Talsperrensteuerung und der Wassersicherheit sinnvoll, sondern auch hinsichtlich der Nutzung volkswirtschaftlicher Ressourcen.

Autor

Prof. Dr. Karsten Rinke

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

Department Seenforschung

Brückstraße 3a

D-39114 Magdeburg

karsten.rinke@ufz.de

Fon.: +49 0341 60254449

<http://www.ufz.de/>

Kurzbeschreibung der Tätigkeit:

Karsten Rinke ist Gewässerökologe und leitet das Department Seenforschung am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Magdeburg. Seine Arbeitsgruppe betreibt gemeinsam mit den Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt und der Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz das Talsperren Observatorium Rappbode im Ostharz. Schwerpunkte seiner Arbeit bilden die Talsperrenmodellierung, neue Monitoringstrategien für die Wasserqualität und die Klima-angepasste Bewirtschaftung von Seen und Talsperren. Karsten Rinke ist ebenfalls an der BTU Cottbus-Senftenberg zum Professor für das Fachgebiet „Management und Modellierung von Seen“ berufen.

Literatur

- Brasseur, G. P., D. Jacob, & S. Schuck-Zöller, 2016. Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer-Verlag.
- Castell-Exner, Claudia, & Meyer, Volker, 2010. Das Multi-Barrieren-Prinzip: Basis für eine sichere und nachhaltige Trinkwasserversorgung. *Energie Wasser Praxis* 2010: 44–99.
- Coumou, D., & S. Rahmstorf, 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 2: 491–496.
- Ho, J. C., A. M. Michalak, & N. Pahlevan, 2019. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 574: 667–670.
- Johnson, C. A., M. Ulrich, L. Sigg, & D. M. Imboden, 1991. A mathematical model of the manganese cycle in a seasonally anoxic lake. *Limnology and Oceanography* 36: 1415–1426.
- Kosten, S., V. L. M. Huszar, E. BÃ©cares, L. S. Costa, E. van Donk, L.-A. Hansson, E. Jeppesen, C. Kruk, G. Lacerot, N. Mazzeo, L. De Meester, B. Moss, M. LÃ¼rling, T. NÃ¼ges, S. Romo, & M. Scheffer, 2012. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Glob. Change Biol.* 18: 118–126.
- Lewis, A. S. L., M. P. Lau, S. F. Jane, K. C. Rose, Y. Be’eri-Shlevin, S. H. Burnet, F. Clayer, H. Feuchtmayr, H.-P. Grossart, D. W. Howard, H. Mariash, J. Delgado Martin, R. L. North, I. Oleksy, R. M. Pilla, A. P. Smagula, R. Sommaruga, S. E. Steiner, P. Verburg, D. Wain, G. A. Weyhenmeyer, & C. C. Carey, 2024. Anoxia begets anoxia: A positive feedback to the deoxygenation of temperate lakes. *Global Change Biology* 30: e17046.
- Meerhoff, M., J. Audet, T. A. Davidson, L. D. Meester, S. Hilt, S. Kosten, Z. Liu, N. Mazzeo, H. Paerl, M. Scheffer, & E. Jeppesen, 2022. Feedback between climate change and eutrophication: revisiting the allied attack concept and how to strike back. *Inland Waters Taylor & Francis* 12: 187–204.
- Mi, C., D. P. Hamilton, M. A. Frassl, T. Shatwell, X. Kong, B. Boehrer, Y. Li, J. Donner, & K. Rinke, 2022. Controlling blooms of *Planktothrix rubescens* by optimized metalimnetic water withdrawal: a modelling study on adaptive reservoir operation. *Environmental Sciences Europe* 34: 102.
- Mi, C., T. Shatwell, J. Ma, V. C. Wentzky, B. Boehrer, Y. Xu, & K. Rinke, 2020a. The formation of a metalimnetic oxygen minimum exemplifies how ecosystem dynamics shape biogeochemical processes: A modelling study. *Water Research Elsevier BV* 175: 115701.
- Mi, C., T. Shatwell, J. Ma, Y. Xu, F. Su, & K. Rinke, 2020b. Ensemble warming projections in Germany’s largest drinking water reservoir and potential adaptation strategies. *Science of The Total Environment* 748: 141366.
- Moss, B., S. Kosten, M. Meerhoff, R. W. Battarbee, E. Jeppesen, N. Mazzeo, K. Havens, G. Lacerot, Z. Liu, L. D. Meester, H. Paerl, & M. Scheffer, 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1: 101–105.
- Nkwalale, L., R. Schwefel, M. Yaghouti, & K. Rinke, 2024. A simple model for predicting oxygen depletion in lakes under climate change. *Inland Waters Taylor & Francis* 1–20.

North, R. P., R. L. North, D. M. Livingstone, O. Koester, & R. Kipfer, 2014. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology* 20: 811–823.

Rinke, K., C. Mi, M. Matthes, & M. Dietze, 2021. Neue Strategien für die Bewirtschaftung der Rappbodetalsperre. *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 70:.

Rinke, K., M. Schultze, C. Mi, T. Shatwell, S. Thober, & D. Cöster, 2023. Auswirkungen des Klimawandels auf Talsperren und mögliche Anpassungsstrategien. *Wasserwirtschaft* 6: 20–23.

Seipel, K., D. Cöster, & K. Rinke, 2023. Gewässergütemonitoring der Rappbodetalsperre in Echtzeit. *gwf Wasser & Abwasser* 164: 61–65.

Umweltbundesamt, 2014. Vorgehen zur quantitativen Risikobewertung mikrobiologischer Befunde im Rohwasser sowie Konsequenzen für den Schutz des Einzugsgebietes und für die Wasseraufbereitung. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 57: 1224–1230.

Woolway, R. I., B. M. Kraemer, J. D. Lenters, C. J. Merchant, C. M. O'Reilly, & S. Sharma, 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 1: 388–403.

Zhan, Q., X. Kong, & K. Rinke, 2022. High-frequency monitoring enables operational opportunities to reduce the dissolved organic carbon (DOC) load in Germany's largest drinking water reservoir. *Inland Waters Taylor & Francis* 12: 245–260.

Tabellen

Variable	Kalibration			Validation		
	R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
Wassertemperatur (°C)	0.99	0.45	0.21	0.97	0.65	0.48
Silikat (mg L ⁻¹)	0.84	0.29	0.13	0.65	0.31	0.17
Nitrat (mg L ⁻¹)	0.69	0.14	0.06	0.37	0.11	0.05
<i>P.rubescens</i> (µg L ⁻¹)	0.56	0.65	0.23	0.48	0.49	0.23
Diatomeen (µg L ⁻¹)	0.55	0.72	0.47	0.21	0.81	0.38
Sauerstoff (mg L ⁻¹)	0.84	0.95	0.67	0.81	0.72	0.48

Tab. 1: Charakterisierung der Modellgüte des 2D-Talsperrenmodells CEQUAL-W2 für die Rappbode-Talsperre für die Kalibrierungsperiode (Jahr 2016) und Validierungsperiode (2015) anhand der drei Gütekriterien Bestimmtheitsmaß (R²), mittlerer quadratischer Modellfehler (RMSE = root mean squared error) und mittlerer absoluter Fehler (MAE = mean absolute error). Zu Details zur Kalibrierung siehe Mi et al. (2020a)

Abbildungen

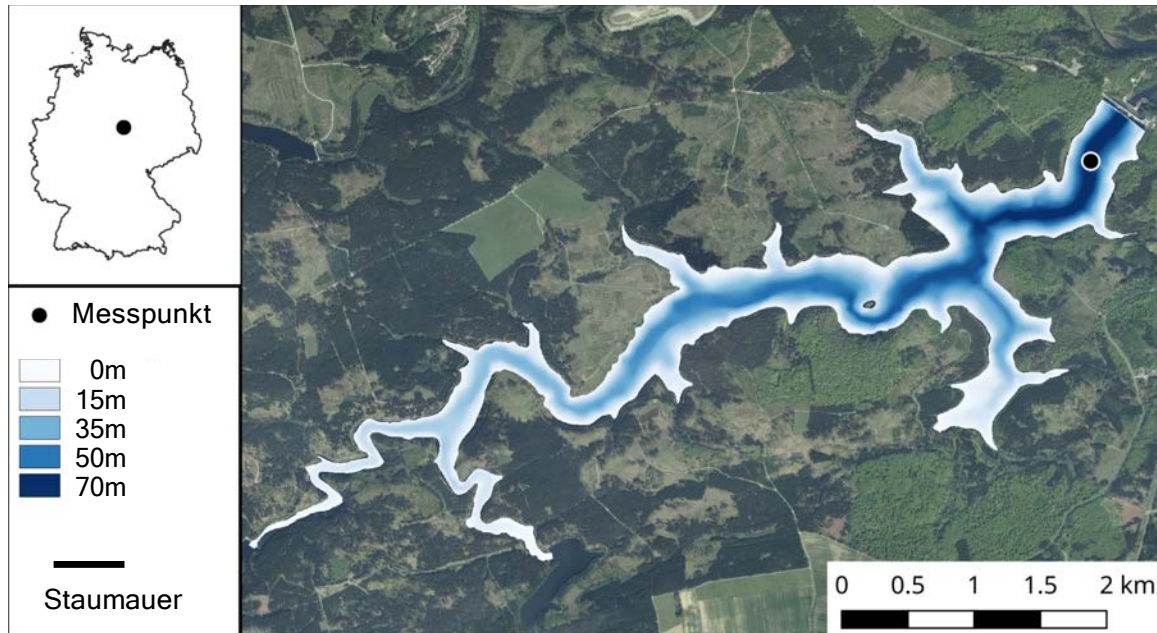


Abb. 1: Lage und Tiefenkarte der Rappbodetalsperre im Osthartz. Sie ist mit einem Gesamtstauraum von 113 Mio m³ und einer maximalen Tiefe von 89 m (mittlere Tiefe: 28.6) ist die Rappbodetalsperre nicht nur Deutschlands größte Trinkwassertalsperre sondern auch Deutschlands tiefste Talsperre. Bei Vollstau beträgt ihre Oberfläche 395 ha.

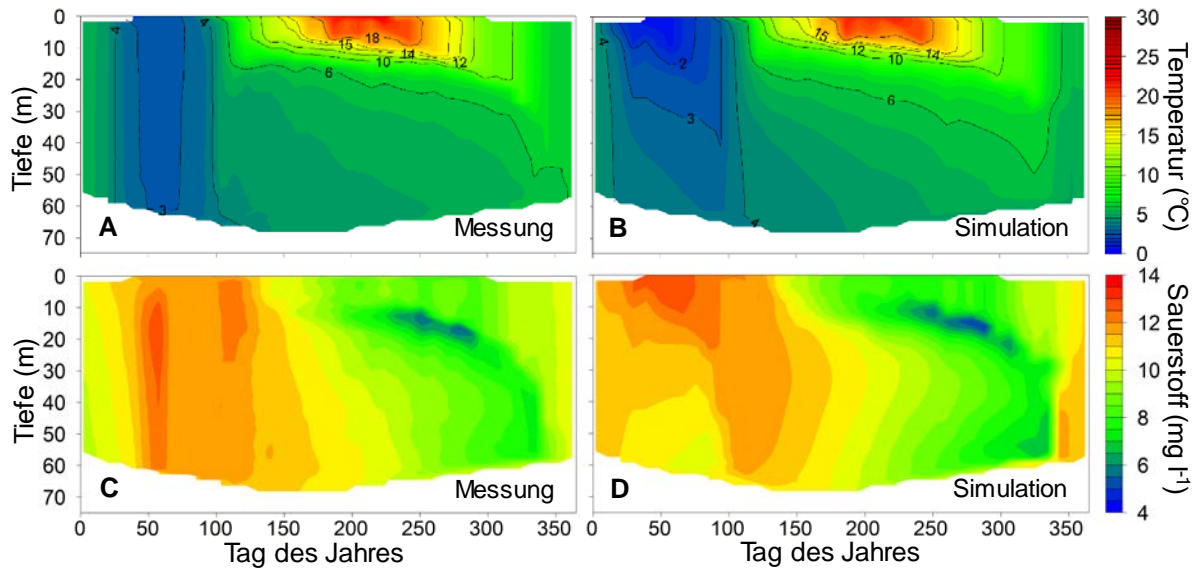


Abb. 2: Simulation der Wassertemperatur (A, B) und der Sauerstoffkonzentration (C,D) in der Rappbodetalsperre. Die Modellsimulation (B, D) kann die gemessenen Dynamiken im Gewässer (A,C) gut reproduzieren

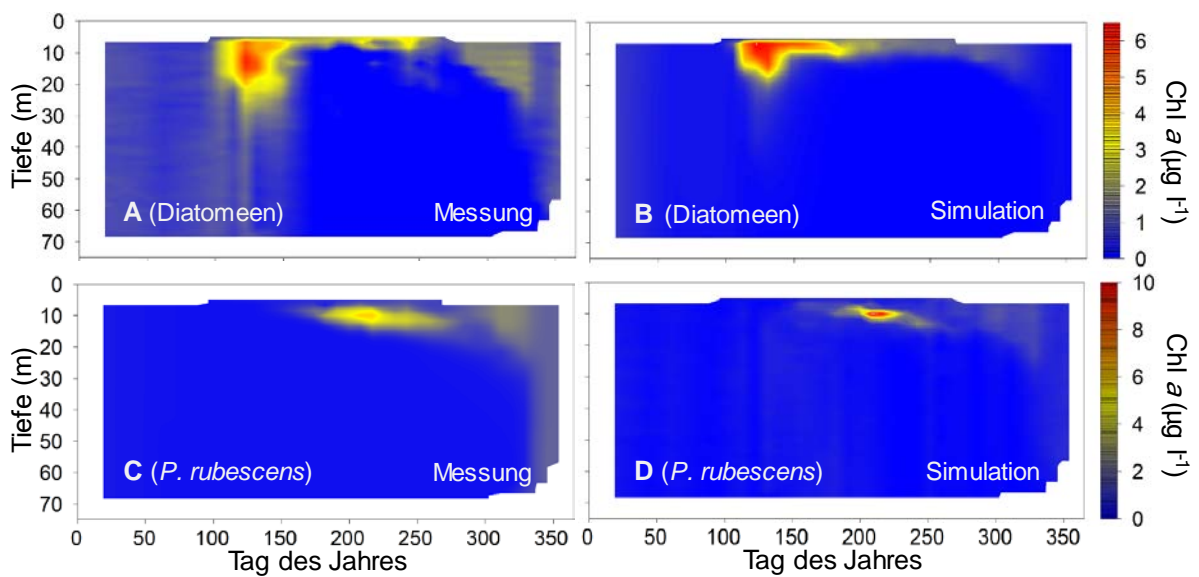


Abb. 3: Simulation der Diatomeen (Kieselalgen, siehe A, B) und dem metalimnisch auftretendem Cyanobakterium *Planktothrix rubescens* (C,D) in der Rappbodetalsperre. Die Modellsimulation (B, D) kann die gemessenen Dynamiken im Gewässer (A,C) gut reproduzieren

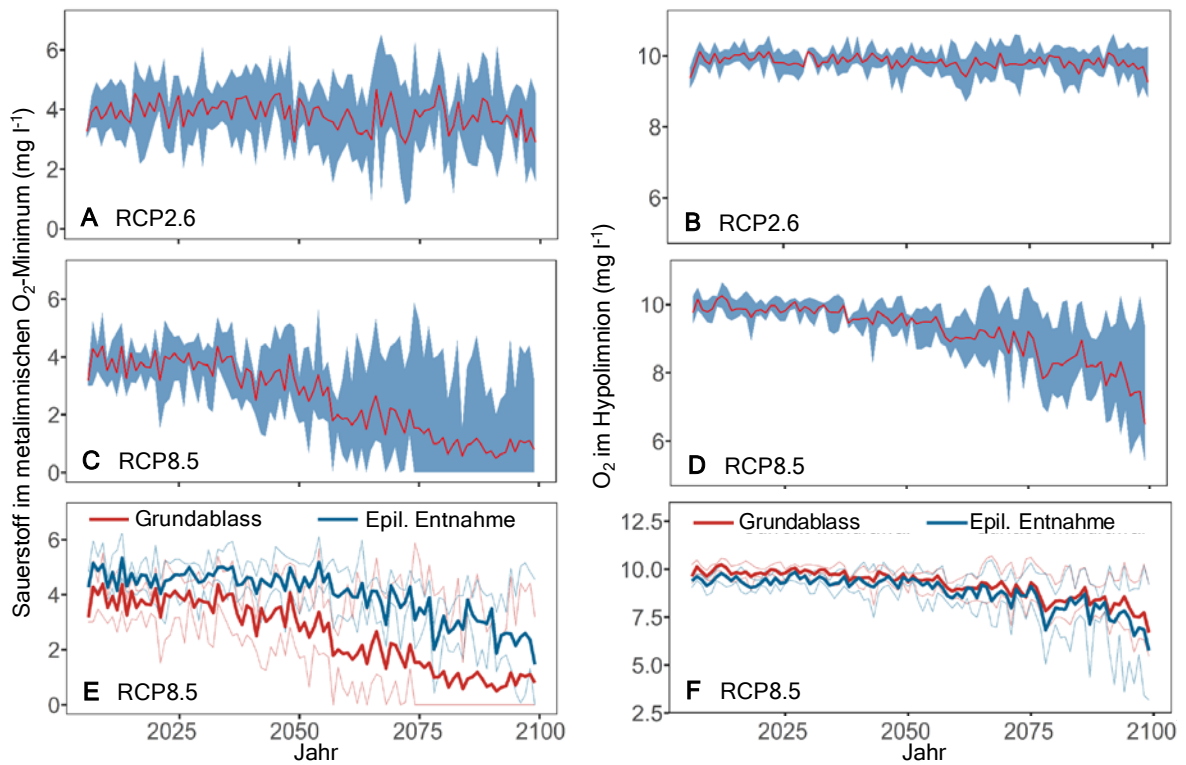


Abb. 4: Prognose der Sauerstoff im metalimnischen Sauerstoffminimum (A,C) und im Hypolimnion (B, D; Mittelwert für Tiefen>35m) für das optimistische Szenario RCP2.6 (A,B) und das pessimistische Szenario (C,D). Der blaue Bereich repräsentiert die Unsicherheit, die durch die unterschiedlichen Klimaszenarien im Modelensemble entsteht (Minimum, Maximum), die rote Linie repräsentiert den Mittelwert des Ensembles. Die unteren Grafiken zeigen die Veränderungen in der Sauerstoffdynamik im Szenario RCP8.5, wenn eine optimierte epilimnische Entnahme für die Wildbettaufgabe implementiert wird (siehe Text), um sauerstoffarmes Wasser aus dem Metalimnion abzuschlagen.

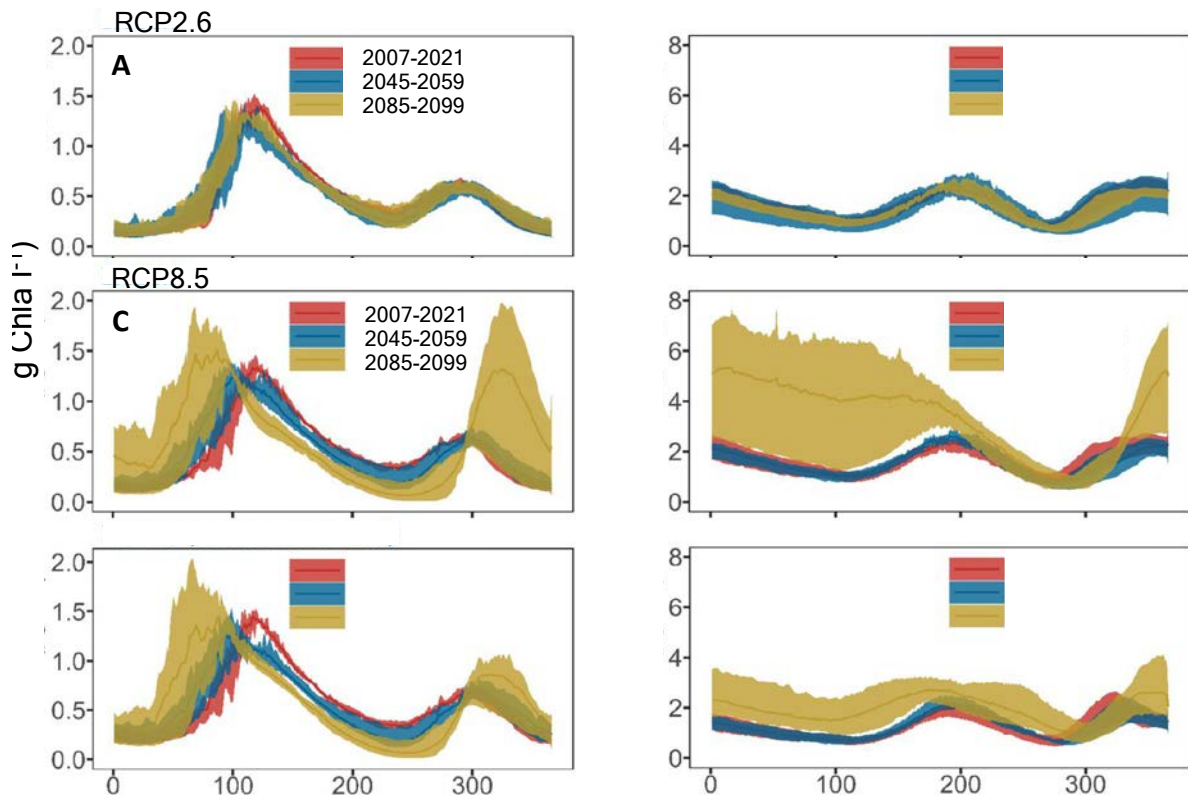


Abb. 5: Saisonale Entwicklung der Diatomeen (A, C, E) und der Cyanobakterie *P. rubescens* (B, D, F) in der Rappbodetalsperre für das optimistische Szenario RCP 2.6 (A, B) und das pessimistische Szenario RCP 8.5 (C, D). Die Verläufe zeigen aggregierte Ergebnisse für die produktive Schicht (oberen 15m) über 15 Jahre, die dicke Linie zeigt hierbei den mittleren Verlauf und das farbliche Band die Streuung (Minimum/Maximum), die unterschiedlichen Farben repräsentieren mittleren Verläufe in den unterschiedlichen Zeiträumen des 21. Jahrhunderts entsprechend der Legende. Die unteren Grafiken zeigen die entsprechenden Dynamiken für ein optimiertes Management der Talsperre mittels einer selektiven Wasserentnahme (E, F, siehe Text) in der die Entwicklung der Cyanobakterie deutlich gebremst wird.