

Klimaanpassungen im Wasserqualitätsmanagement unserer Trinkwassertalsperren

Forschungsergebnisse und Synergien zwischen Praxis und Forschung

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.

von: Prof. Dr. Karsten Rinke (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung)

Mit fortschreitender Klimaerwärmung erwarten uns nicht nur höhere mittlere Temperaturen in Deutschland, 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 [1] und zunehmenden Extremereignissen [2] 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 [3]. Bezüglich der Wasserqualität kehrt sich deshalb die Rolle der Talsperren im Klimawandel um. Während im Kontext des Wassermanagements die Talsperren eine signifikante Rolle in der Klimaanpassung spielen, sind die Talsperren hinsichtlich der Wasserqualität erheblichen Verschlechterungen ausgesetzt und bisherige Dienstleistungen stehen zunehmend infrage, 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 Mittelgebirgsgebiet 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 [4, 5] dargestellt. Demnach müssen wir mit erheblichen Temperaturzunahmen in den Oberflächenschichten bis zu 4–6K, je nach Klimaszenario, und mit verlängerten sommerlichen Schichtungsdauern von 1–2 Monaten rechnen. Eine Erwärmung des Tiefenwassers kann aber durch eine Umstellung der Wildbettgabe aus dem Epilimnion anstelle einer Abgabe aus dem Hypolimnion verhindert werden. Diese bestehenden Arbeiten fokussieren aber vor allem die Auswirkungen auf die Temperaturverhältnisse und die physikalische Struktur, gehen aber kaum auf ökosys-

temare Komponenten wie Sauerstoffhaushalt oder Phytoplanktondynamik ein. Dieser Beitrag fokussiert deshalb auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemdynamik unserer Gewässer und beleuchtet hierbei aktuelle Fortschritte in der Modellierung und Klimafolgenprognose sowie die Synergien zwischen Forschung und Praxis in der Entwicklung von Anpassungsstrategien sowie den aktuellen Forschungsbedarf.

Stand der Forschung: Klimabedingte Entwicklungen, Talsperrenmodellierung und Prognen der Wasserqualität

Standgewässer und ihre Ökosysteme reagieren empfindlich auf Klimaveränderungen. Bereits heute sind Auswirkungen des Klimawandels statistisch signifikant darstellbar, dies betrifft vor allem Seen, die weitaus besser untersucht sind als Talsperren. Die verfügbare 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 [6]
- vermehrtes Auftreten von „Cyanobakterien- und Algenblüten“ durch höhere Temperaturen und Nährstoffverhältnisse [7, 8]
- Veränderungen im Sauerstoffhaushalt in Form von zunehmender Anoxie im Tiefenwasser durch längere Stratifikationszeiten, erhöhte Temperatur und steigende Produktivität [9]
- schnelle Ökosystemveränderungen durch selbstverstärkende interne Mechanismen,

z. B. in Form einer Kaskade: Sauerstoffabnahme im Tiefenwasser → verstärkte Nährstofffreisetzung → erhöhtes Algenwachstum → höherer Sauerstoffbedarf [10, 11].

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 allem für die Auswirkungen auf die Wassertemperaturen und Schichtungsverhältnisse beschränkt [12] 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 [13].

Tieferegreifende Prognosen für Ökosystemkomponenten wie z. B. Nährstoffe, Plankton oder Primärproduktion existieren aber nur für einzelne Gewässer und ein kleiner Teil dieser Gewässer-spezifischen Studien adressiert Trinkwassertalsperren. In Deutschland ist diesbezüglich die Rappbodetalssperre (Abb. 1), Deutschlands größte Trinkwassertalsperre, verhältnismäßig gut untersucht, denn für dieses Gewässer liegen ausgezeichnete Wassergütedaten sowie ein angepasstes und validiertes ▶

Dieser Beitrag ist Teil einer Serie zum Thema „Trinkwassertalsperren im Klimawandel“. Weitere Texte sind in der Ausgabe 8/24 erschienen bzw. werden in der Ausgabe 10/24 veröffentlicht.

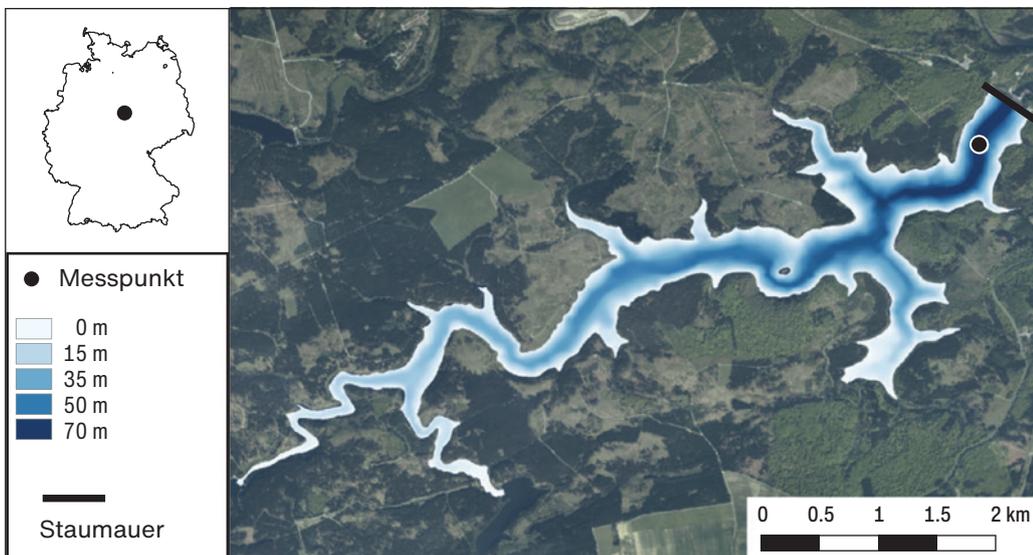


Abb. 1: Lage und Tiefenkarte der Rappbodetalssperre im Osthartz

Talsperrenmodell vor. Dieses Modell ist ein gekoppeltes hydrophysikalisch-ökologisches 2D-Modell (CEQUAL-W 2, siehe 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 Rappbodetalsperre zeigt, dass das

Modell sowohl physikalische als auch 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 hervor-

zuheben, 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 Bestimmtheitsmasse oder verschiedene Fehlerindizes, ist

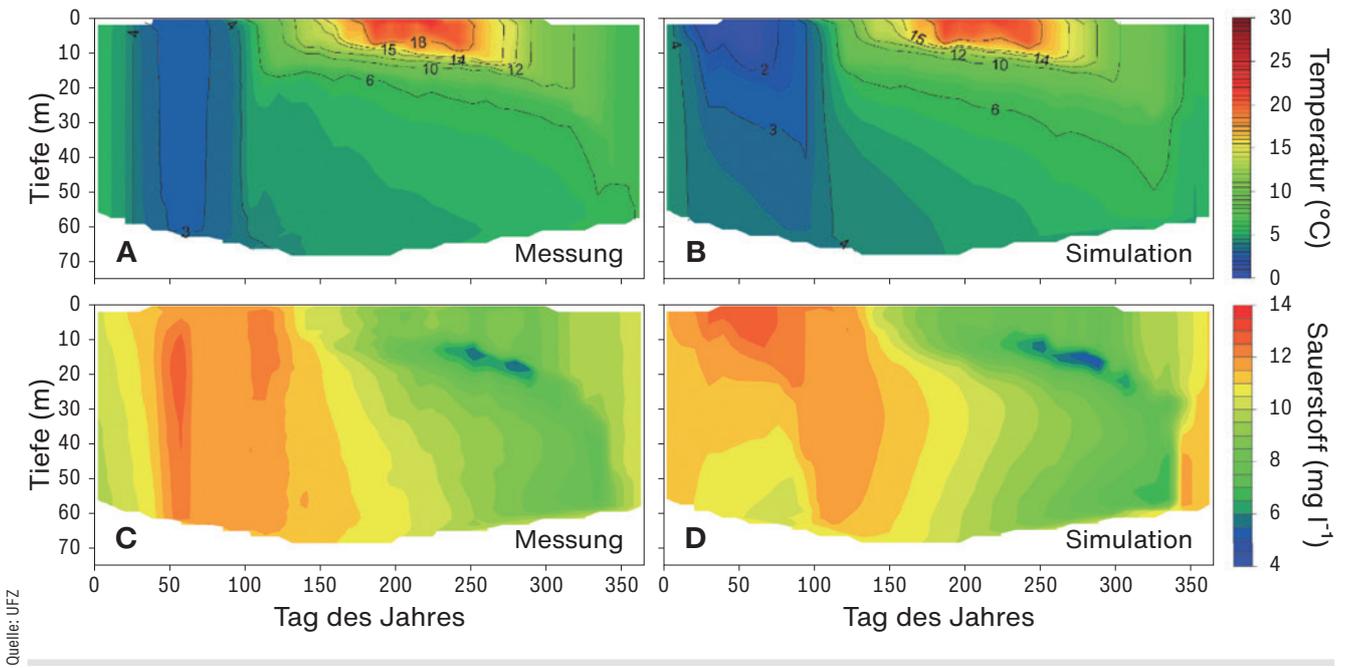


Abb. 2: Simulation der Wassertemperatur (A, B) und der Sauerstoffkonzentration (C, D) in der Rappbodetalsperre. Die Modellsimulation (B, D) kann die gemessenen Dynamiken im Gewässer (A, C) gut reproduzieren.

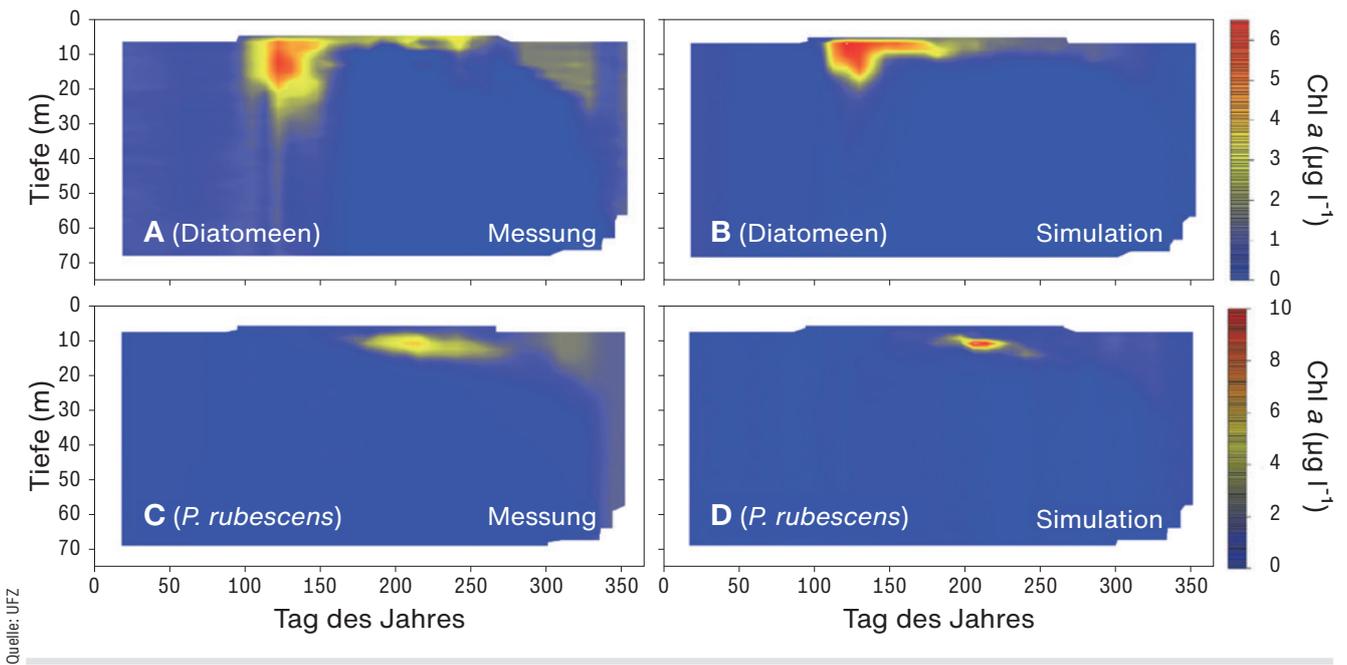


Abb. 3: Simulation der Diatomeen (Kieselalgen, A, B) und des metalimnisch auftretenden Cyanobakteriums *Planktothrix rubescens* (C, D) in der Rappbodetalsperre. Die Modellsimulation (B, D) kann die gemessenen Dynamiken im Gewässer (A, C) gut reproduzieren.

Tabelle 1: Charakterisierung der Modellgüte des 2D-Talsperrenmodells CEQUAL-W 2 für die Rappbodetalsperre 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 [14].

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

Quelle: UFZ

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 [14].

Eine 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 optimis-

tischen Entwicklung unter Einhaltung der Pariser Klimaziele (Erwärmung im Bereich 1,5–2K, 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 [13] und [4] 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 Metalimnion deutlich abnimmt (Abb. 4 A–D, siehe ▶

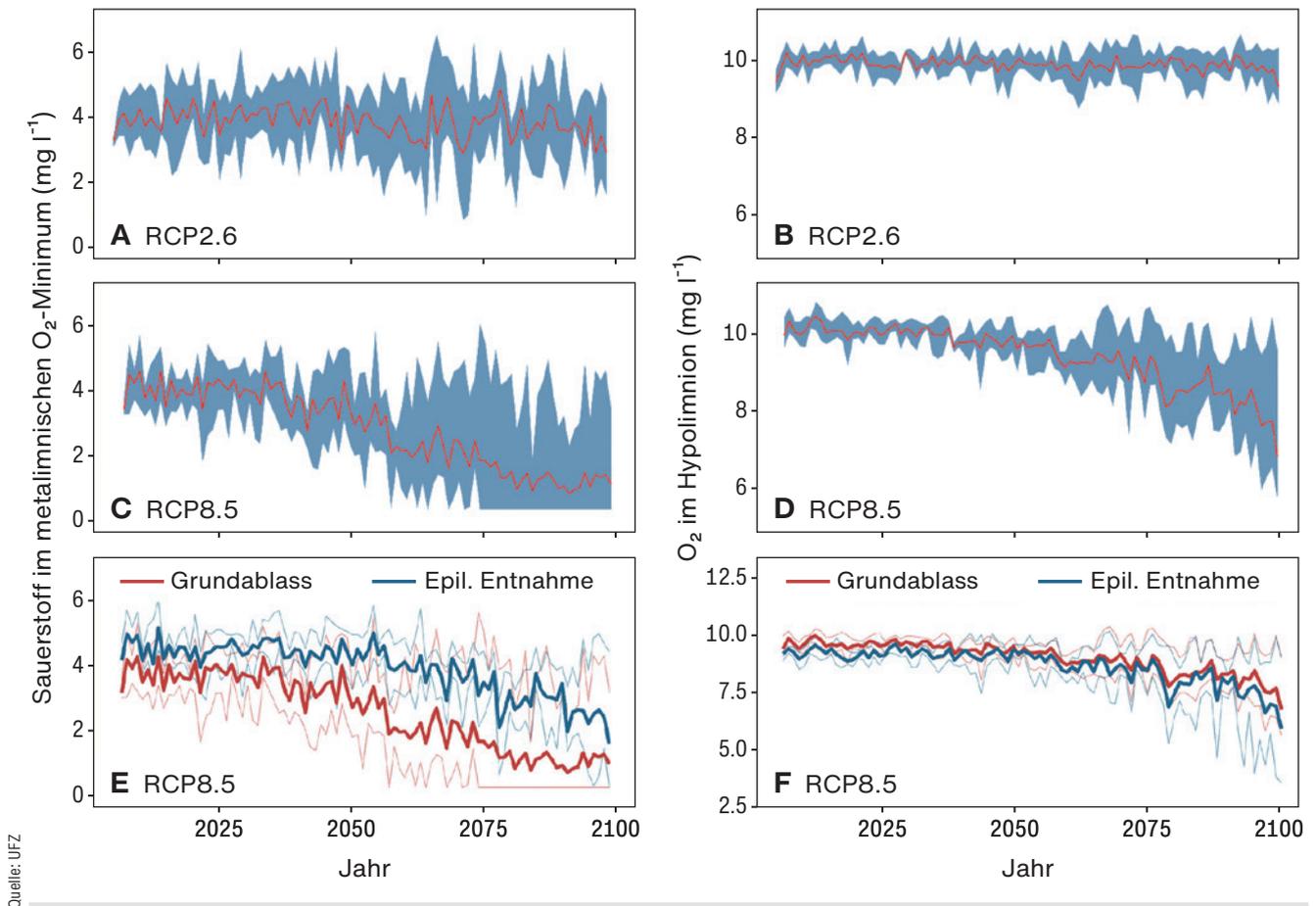
Gemischtes Doppel



Die führende Fachzeitschrift der deutschen Energie- und Wasserbranche + immer als E-Paper mit dabei.

Lesen Sie die DVGW energie | wasser-praxis nicht nur in gedruckter Form, sondern auch digital! Egal, ob auf dem heimischen Bildschirm oder unterwegs via Tablet und Smartphone: Abonnenten und DVGW-Mitglieder können kostenlos auf das E-Paper zugreifen. Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeiten finden Sie unter epaper.energie-wasser-praxis.de!





Quelle: UFZ

Abb. 4: Prognose des Sauerstoffgehalts im metalimnischen Sauerstoffminimum (A, C) und im Hypolimnion (B, D; Mittelwert für Tiefen > 35 m) für das optimistische Szenario RCP2.6 (A, B) und das pessimistische Szenario (C, D). Blauer Bereich: Unsicherheit durch unterschiedliche Klimaszenarien. Rote Linie: Mittelwert. Die unteren Grafiken zeigen die Veränderungen in der Sauerstoffdynamik im Szenario RCP8.5, wenn eine optimierte epilimnische Entnahme für die Wildbettabgabe implementiert wird, um sauerstoffarmes Wasser aus dem Metalimnion abzuschlagen.

auch [15]) und gegen Ende des Jahrhunderts Konzentrationsbereiche erreicht, in denen Manganrücklösung eintritt (üblicherweise bei Unterschreitung von 1–2 mg/l Sauerstoff [16]). Hierbei ist zu beachten, dass für das Hypolimnion in **Abbildung 4** der Mittelwert für Tiefen > 35 m dargestellt ist und sich die tiefen, Sediment-nahen Bereiche des Hypolimnions 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 län-

gere 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 Phytoplanktondynamik nahezu gleichbleibt, kommt es bei starker Klimaerwärmung im Szenario RCP8.5 zu tiefgreifenden Veränderungen der Planktonsuccession (**Abb. 5**, siehe auch [15]):

- 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 Geneareth). In diesen Gewässern spielt das Recycling

der Nährstoffe eine wichtigere Rolle, weil die Mineralisierung Temperaturbedingt 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 miterfasst. Bisher ist dies bei der Rappbodetalsperre nicht der Fall, denn *P. rubescens* kommt gegenwärtig nur im Sommer vor, wenn die

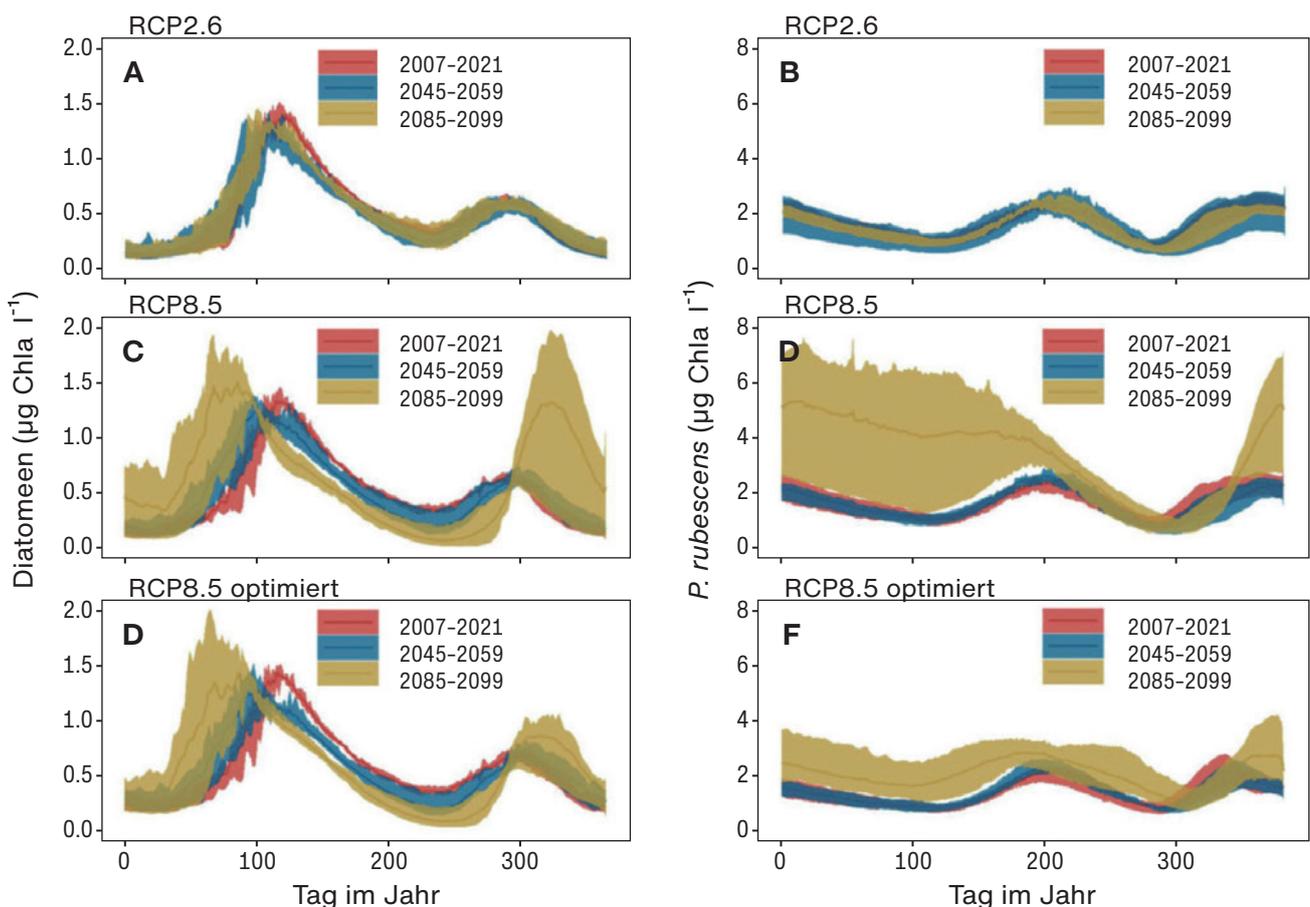
Talsperre geschichtet ist, und bleibt auf das Metalimnion beschränkt (Abb. 3). Zu dieser Zeit wird aber das Rohwasser aus dem tiefen Hypolimnion entnommen, wo die Cyanobakterien nicht vorkommen. Diese Barriere existiert aber in der Zukunft nicht mehr und es wird wahrscheinlicher, dass *P. rubescens* 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 ernsthafte 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 etc.). 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 darauffolgenden milden Winters.

Anpassungsoptionen im Talsperrenmanagement und Synergien zwischen Forschung und Praxis

Eine Talsperre ist ein sehr vielseitig bewirtschaftbares System und bietet Steuermöglichkeiten, über die ▶



Quelle: UFZ

Abb. 5: Saisonale Entwicklung der Diatomeen (A, C, E) und der Cyanobakterie *P. rubescens* (B, D, F) in der Rappbodetalsperre für das optimistische Szenario RCP2.6 (A, B) und das pessimistische Szenario RCP8.5 (C, D). Die Verläufe zeigen aggregierte Ergebnisse für die produktive Schicht (obere 15 m) über 15 Jahre, die dicke Linie zeigt hierbei den mittleren Verlauf und das farbliche Band die Streuung (Minimum/Maximum), die unterschiedlichen Farben repräsentieren mittlere Verläufe in den unterschiedlichen Zeiträumen. Die unteren Grafiken zeigen die entsprechenden Dynamiken für ein optimiertes Management der Talsperre mittels einer selektiven Wasserentnahme (E, F), in der die Entwicklung der Cyanobakterie deutlich gebremst wird.



Der Talsperrenbetrieb hat erheblichen Einfluss auf die Ökosystemdynamik, wodurch wirksame Instrumente zur Klimaanpassung generiert werden können.

ein natürlicher See nicht verfügt. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Wasserentnahme 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 (Wildbettabgabe) kann flexibel gestaltet und dafür genutzt werden, „unerwünschtes Wasser“ zu entfernen. Hierdurch können z. B. sauerstoffarme oder Blaualgen-belastete Wasserschichten abgegeben 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 [5].

Unsere Modellsimulationen zeigen, dass auch Variablen wie Sauerstoff, Nährstoffe und Algen hierdurch stark beeinflusst werden. Bei einem tiefenselektiven Betrieb der Wildbettabgabe, z. B. durch schwenkbare Entnahmefrastrukturen, 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 durch eine gezielte Entnahme aus der entsprechenden Wassersicht deutlich begrenzen und die hohen Biomassen der Cyanobakterien im Winter können vermieden werden (Abb. 5E & F). Simulationen zur Identifikation der optimalen Entnahmetiefe und des wirksamsten Zeitfens-

ters zeigen, dass die Wirkung der selektiven Entnahme nicht nur auf der Entfernung der Biomasse der Cyanobakterien beruht, sondern auch durch den Export von Nährstoffen aus den Gewässerzonen mit intensivem Nährstoffrecycling [17], sodass das Wachstumspotenzial für die Cyanobakterien 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 „Aschenputtelprinzips“ 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 Prozent vermindern [18]. Diese Steuermöglichkeiten von Talsperren, die in natürlichen Seen nicht existieren, sind einerseits sehr wirksam 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. Bei Abgabe von schlechter Wasserqualität müssen auch mögliche Auswirkungen auf den Unterlauf beachtet werden.

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 einen rechtzeitigen Planungsbeginn. Diese Randbedingungen gelten auch für andere bauliche Maßnahmen zur Klimaanpassung wie z. B. Mauererhöhungen oder Investitionen in die Trinkwasseraufbereitung (siehe [5] für eine Übersicht über potenzielle bauliche Maßnahmen). Gleichzeitig müssen auch Leitlinien für den Betrieb der Infrastrukturen bereitgestellt werden, die sich in das vorhandene Wassermengen- und Wassergütemanagement der Anlage integrieren. 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 in der Regel Nahe-Echtzeit-Monitoringsysteme erforderlich, die sowohl die Wassermengen- als auch die Wasserqualitätsvariablen abdecken. Die Sensorik und Regeltechnik hierfür ist vorhanden und

der Einsatz in Trinkwassertalsperren erprobt [19]. Auch für die Erfolgskontrolle der Maßnahmen ist ein gezieltes und langfristiges Monitoring notwendig, genauso wie auch zur Identifikation langfristiger Trends.

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 klimaangepassten Talsperrensteuerung und der Wassersicherheit sinnvoll, sondern auch hinsichtlich der Nutzung volkswirtschaftlicher Ressourcen. ■

Literatur:

- [1] Brasseur, G. P., Jacob, D. & Schuck-Zöllner, S.: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer-Verlag, 2016.
- [2] Coumou, D., & Rahmstorf, S.: A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 2, 2012, S. 491-496.
- [3] Meerhoff, M., Audet, J., Davidson, T. A., Meester, L. D., Hilt, S., Kosten, S., Liu, Z., Mazzeo, N., Paerl, H., Scheffer, M. & Jepsen, E.: Feedback between climate change and eutrophication: revisiting the allied attack concept and how to strike back. *Inland Waters Taylor & Francis* 12, 2022, S. 187-204.
- [4] Rinke, K., Mi, C., Matthes, M. & Dietze, M.: Neue Strategien für die Bewirtschaftung der Rappbodetalsperre. In: *wvt Wasserwirtschaft Wassertechnik* 70, 2021.
- [5] Rinke, K., Schultze, M., Mi, C., Shatwell, T., Thober, S. & Cöster, D.: Auswirkungen des Klimawandels auf Talsperren und mögliche Anpassungsstrategien. In: *Wasserwirtschaft* 6, 2023, S. 20-23.
- [6] Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jepsen, E., Mazzeo, N., Havens, K., Lacerot, G., Liu, Z., Meester, L. D., Paerl, H. & Scheffer, M.: Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1, 2011, S. 101-105.
- [7] Kosten, S., Huszar, V. L. M., Bécáres, E., Costa, L. S., van Donk, E., Hansson, L.-A., Jeppesen, E., Kruk, C., Lacerot, G., Mazzeo, N., De Meester, L., Moss, B., Lürling, M., Nöges, T., Romo, S. & Scheffer, M.: Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Glob. Change Biol.* 18, 2012, S. 118-126.
- [8] Ho, J. C., Michalak, A. M. & Pahlevan, N.: Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 574, 2019, S. 667-670.
- [9] Nkwale, L., Schwefel, R., Yaghouti, M. & Rinke, K.: A simple model for predicting oxygen depletion in lakes under climate change. *Inland Waters Taylor & Francis*, 2024, S. 1-20.
- [10] North, R. P., North, R. L., Livingstone, D. M., Koester, O. & Kipfer, R.: 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, 2014, S. 811-823.
- [11] Lewis, A. S. L., Lau, M. P., Jane, S. F., Rose, K. C., Be'erishlevin, Y., Burnet, S. H., Clayer, F., Feuchtmayr, H., Grossart, H.-P., Howard, D. W., Mariash, H., Delgado Martin, J., North, R. L., Oleksy, I., Pilla, R. M., Smagula, A. P., Sommaruga, R., Steiner, S. E., Verburg, P., Wain, D., Weyhenmeyer, G. A. & Carey, C. C.: Anoxia begets anoxia: A positive feedback to the deoxygenation of temperate lakes. *Global Change Biology* 30, 2024, e17046.
- [12] Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M. & Sharma, S.: Global lake responses to climate change. In: *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 2020, S. 388-403.
- [13] Mi, C., Shatwell, T., Ma, J., Xu, Y., Su, F. & Rinke, K.: Ensemble warming projections in Germany's largest drinking water reservoir and potential adaptation strategies. *Science of The Total Environment* 748: 141366, 2020b.
- [14] Mi, C., Shatwell, T., Ma, J., Wentzky, V. C., Boehrer, B., Xu, Y. & Rinke, K.: The formation of a metalimnetic oxygen minimum exemplifies how ecosystem dynamics shape biogeochemical processes: A modelling study. *Water Research Elsevier BV* 175: 115701, 2020a.
- [15] Mi, C., Shatwell, T., Kong, X. & Rinke, K.: Cascading climate effects in deep reservoirs: Full assessment of physical and biogeochemical dynamics under ensemble climate projections and ways towards adaptation. *Ambio* 2023. Online unter: <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01950-0>.
- [16] Johnson, C. A., Ulrich, M., Sigg, L. & Imboden, D. M.: A mathematical model of the manganese cycle in a seasonally anoxic lake. *Limnology and Oceanography* 36, 1991, S. 1415-1426.
- [17] Mi, C., Hamilton, D. P., Frassl, M. A., Shatwell, T., Kong, X., Boehrer, B., Li, Y., Donner, J. & Rinke, K.: Controlling blooms of *Planktothrix rubescens* by optimized metalimnetic water withdrawal: a modelling study on adaptive reservoir operation. *Environmental Sciences Europe* 34, 2022, S. 102.
- [18] Zhan, Q., Kong, X. & Rinke, K.: 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, 2022, S. 245-260.
- [19] Seipel, K., Cöster, D. & Rinke, K.: Gewässergütemonitoring der Rappbodetalsperre in Echtzeit. In: *gwf Wasser & Abwasser* 164. 2023, S. 61-65.

Der Autor

Karsten Rinke ist Gewässerökologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung und Professor an der BTU Cottbus-Senftenberg.

Kontakt:

Prof. Dr. Karsten Rinke
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)
Department Seenforschung
Brückstr. 3a
39114 Magdeburg
Tel.: 0341 60254449
E-Mail: karsten.rinke@ufz.de
Internet: www.ufz.de



Attraktive Werbeartikel
shop.wvgw.de