

Nicht nur Temperatur – wie der Klimawandel Trinkwassertalsperren beeinflusst

Johannes Feldbauer (Dresden), Tilo Hegewald (Pirna), Thomas U. Berendonk und Thomas Petzoldt (Dresden)

Zusammenfassung

Die globale Klimaerwärmung führt in Talsperren zu einem Anstieg der Wassertemperatur und einer Verlängerung der sommerlichen Schichtung, wodurch einerseits biogeochemische Prozesse und damit die Wasserqualität beeinflusst werden. Andererseits kann die thermische Struktur von Talsperren durch Anpassung der Entnahmetiefe aktiv gesteuert werden. Anhand von Messdaten und mit Hilfe von hydrophysikalischen Modellen haben wir die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Temperatur und Schichtung von Talsperren sowie mögliche Anpassungsstrategien untersucht. Die Wassertemperatur im Tiefenwasser und das Ende der sommerlichen Schichtung können durch das Entnahmeregime gesteuert werden. Die Simulationen zeigen, dass eine Steuerung der Entnahmetiefen den Klimaerwärmungseffekt der letzten 30 Jahre bisher teilweise kompensieren konnte.

Schlagwörter: Talsperre, Klimawandel, Schichtung, Entnahmetiefen, Wassertemperatur, Hydrophysikalische Modelle

DOI: 10.3243/kwe2023.04.003

Abstract

More than changing temperatures – how climate change is impacting drinking water reservoirs

Global warming is leading to an increase in water temperature and extending summer stratification in reservoirs, influencing biogeochemical processes and thus water quality. On the other hand, the thermal structure of reservoirs can be actively managed by adjusting extraction depth. We analysed the impacts of a warming climate on the temperature and stratification of reservoirs and examined possible adaptation strategies by drawing on readings and hydrophysical models. Water temperature in deep waters and the end of summer-time stratification can be managed using the extraction regime. Simulations show that managing extraction depths has so far partly offset the impact of the warming climate seen over the past 30 years.

Keywords: Reservoir, climate change, stratification, extraction depths, water temperature, hydrophysical models

Einführung

Die Auswirkungen der Klimaerwärmung sind in Seen und Talsperren bereits deutlich zu erkennen: Parallel zu sich erhöhenden Lufttemperaturen führt der Klimawandel zu einer Erhöhung der Wassertemperatur und einer Verkürzung der Eisbedeckung [1, 2]. Mit der Erhöhung der Wassertemperatur geht in geschichteten Gewässern die Verlängerung der sommerlichen Schichtungsperiode einher, was auch zu einer Änderung des Schichtungstyps z. B. von dimiktisch (zwei Vollzirkulationen im Jahr) zu monomiktisch (eine Vollzirkulation im Jahr) führen kann. Die Veränderungen sind progressiv fortschreitend und lassen sich mit vorhandenen Messdaten klar nachvollziehen [3]. Die beschriebenen Auswirkungen beeinträchtigen die Wassergüte und zeigen Parallelen zur großräumigen anthropogen verursachten Eutrophierung der Gewässer in den 1970er und 1980er Jahren [4]. Von einer erhöhten Wassertemperatur, Schichtungsdauer und Schichtungsstabilität profitieren vor allem Cyanobakterien (Blualgen), von denen einige toxisch sind [5]. Insbesondere in meso- und eutrophen Gewässern kann die

Verlängerung der Schichtung zu hyp-/anoxischen Bedingungen am Ende des Sommers führen. Dadurch kann sich deren Wasserbeschaffenheit unter Umständen weiter verschlechtern.

Stauanlagen sind von den Auswirkungen des Klimawandels sowohl technisch als auch aus Sicht der Bewirtschaftung unmittelbar selbst betroffen. Sie bieten jedoch zugleich dank vielfältiger Anpassungsmöglichkeiten gute Voraussetzungen die Auswirkungen des Klimawandels zu kompensieren. Die Anpassungsoptionen hängen dabei insbesondere von der Bewertung der Systemdienstleistungen und ihrer Priorisierung ab. Aus Wissenschaft und Praxis werden dazu unterschiedliche konkrete Strategien vorgeschlagen, teils im Einzugsgebiet der Gewässer, teils direkt im Gewässer oder durch eine angepasste Bewirtschaftung. Eine mögliche Anpassungsmaßnahme ist beispielsweise eine Änderung der Entnahmetiefe für das Rohwasser zur Trinkwassergewinnung und die Wildbettabgabe. Als Wildbettabgabe wird dabei das Wasser bezeichnet, welches an das Gewässer unterhalb der Staumauer abgegeben wird. In

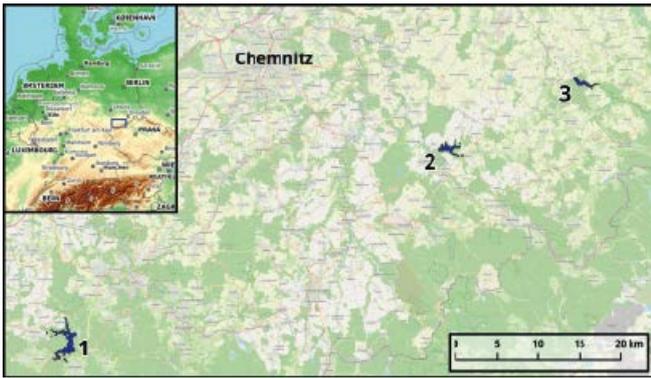


Abb. 1: Karte mit den untersuchten Talsperren Eibenstock (1) Saidenbach (2) und Lichtenberg (3). Datenquellen: OpenStreet-Map und OpenStreetMap Foundation 2022, zusätzliche Daten vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen.

diesem Zusammenhang wird insbesondere ein Wechsel der Wildbettaabgabe aus dem Grundablass hin zu einer oberflächennahen Abgabe diskutiert [6, 7]. Dabei ist zu beachten, dass die Sauerstoffkonzentration im Hypolimnion (kaltes Tiefenwasser in der Schichtungsperiode) nicht unter kritische Werte abfällt. Da bautechnische Anpassungsmaßnahmen in der Regel aufwendig und teuer sind, ist deren Wirksamkeit im Vorfeld zu überprüfen.

Für die Planung und die Bewertung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen ist der Einsatz von Computersimulationen zielführend. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Unsicherheit der Simulationsergebnisse. Die klare Benennung und Quantifizierung von Unsicherheiten ist besonders dann wichtig, wenn Ergebnisse von Simulationen zur Unterstützung von Entscheidungen verwendet werden sollen [8]. Als wichtigste Quellen für die Modellunsicherheit gelten die Fehler bzw. Unsicherheit der Antriebsdaten, die Unsicherheit der Modellparameter sowie die strukturelle Unsicherheit der Modelle selbst. In die strukturelle Unsicherheit fließen dabei die verschiedenen Modellannahmen und Beschreibungen der simulierten Prozesse ein [9]. Zur Quantifizierung derartiger Unsicherheiten können sogenannte Modellensembles verwendet werden. Ein Ensemble ist eine Reihe von verschiedenen Modellläufen mit unterschiedlichen Randbedingungen oder Modellannahmen. Diese Methode ist in den Klimawissenschaften bereits gängig, wurde aber für die Wassergütesimulation von Seen und Talsperren bisher nur im Ausnahmefall angewendet. Ein R-Paket erlaubt es jetzt, eine Ensemble-Modellierung mit fünf verschiedenen hydrophysikalischen Seenmodellen gleichzeitig durchzuführen [10].

Hydrophysikalische Simulation von Talsperren

Um die zukünftige Entwicklung von Wassertemperatur, sommerlicher Schichtungsdauer und Eisbedeckung abzuschätzen sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin zu testen, haben wir für drei Talsperren in Sachsen (Abbildung 1) vorhandene Messdaten analysiert und mehrere eindimensionale hydrophysikalische Seen- und Talsperrenmodelle angewendet.

Die fünf benutzten Modelle sind deterministischer Natur und basieren auf physikalischen Grundsätzen, verwenden aber zum Teil differierende mathematische Beschreibungen für die

darin enthaltenen Prozesse, wie z. B. unterschiedliche Ansätze für die Beschreibung der Durchmischung. Alle Modelle benötigen meteorologische und hydrologische Antriebsdaten wie z. B. Zufluss, Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur und liefern daraus tägliche Werte für Wassertemperatur und Dichte in vertikaler Auflösung sowie Dauer und Stärke der winterlichen Eisbedeckung bzw. der sommerlichen Schichtung.

Konkret wurden die Modelle FLake [11], GLM [12], GOTM [13], Simstrat [14] und MyLake [15] genutzt, sowie das R-Paket LakeEnsemblR [10]. Die Anpassungsstrategien wurden mit zwei verschiedenen Modellen simuliert: GLM [12] für die Talsperren Lichtenberg, Eibenstock und Saidenbach sowie GOTM [13] für eine idealisierte Talsperre in den mittleren gemäßigten Breiten. Die Verwendung einer solchen idealisierten Talsperre lässt mit Hilfe von Testszenerien Rückschlüsse auf eine große Zahl an Gewässern mit ähnlicher Charakteristik zu, ohne diese alle explizit simulieren zu müssen.

Um den Einfluss eines sich zukünftig progressiv erwärmenden Klimas auf Gewässer abzuschätzen, werden regionalisierte Klimadaten als Modellantriebe benötigt. Für die meteorologischen Verhältnisse sind hierzu inzwischen eine Vielzahl von verschiedenen Daten für unterschiedliche Klimaszenarien verfügbar. Für die Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen werden solche z. B. über das ReKIS Portal (<https://rekis.hydro.tu-dresden.de/>) bereitgestellt. Für Talsperren ist es darüber hinaus sinnvoll, hydrologische Antriebsdaten unter verändertem Klima zu verwenden. Diese können über geeignete Niederschlags-Abflussmodelle generiert werden. Solche Modellketten, die die Folgen der Klimaerwärmung auf Landnutzung oder Gewässer abschätzen, werden auch als Impaktmodelle bezeichnet. In unserer Studie haben wir verschiedene Läufe des SRES Szenario A1B [16] für die Talsperre Lichtenberg gerechnet [17]. Das Szenario beschreibt eine Welt mit einem Rückgang der globalen Bevölkerung ab etwa 2050 und einer ausgewogenen Energiegewinnung aus erneuerbaren und fossilen Quellen. Als mögliche Anpassungsstrategien wurden Szenarien mit verschiedenen Entnahmetiefen miteinander verglichen, insbesondere die Variation der Entnahmehöhe für die Wildbettaabgabe [18]. Vor der Szenarioanalyse wurden die Modelle an historischen Daten kalibriert. Danach wurde ihre

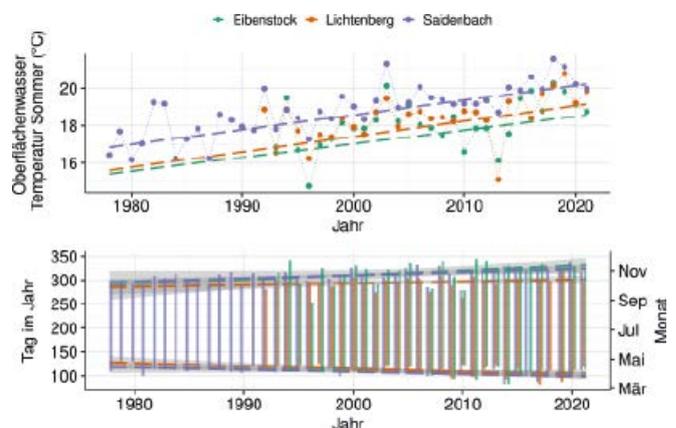


Abb. 2: Zeitreihen für die sommerliche Oberflächenwassertemperatur (in 1 m Tiefe) mit Trendlinien für die drei untersuchten Talsperren (oben) und Dauer der Sommerstagnation (unten). Die vertikalen Balken kennzeichnen den Kalendertag von Beginn und Ende der Sommerstagnation, die grauen Flächen um die Trendlinien kennzeichnen den Standardfehler der Regressionsgeraden.

Fähigkeit zur Simulation der Temperaturschichtung an unabhängigen Daten geprüft [17, 18].

Auswirkung der Klimaerwärmung

Für die Talsperren Eibenstock, Lichtenberg und Saidenbach standen zwei- bis vierwöchig gemessene Temperaturprofile aus dem Zeitraum von 1980 bis 2021 zur Verfügung. Aus diesen wurden zunächst die monatlichen Mittelwerte (Juni bis September) der Oberflächentemperatur bestimmt und anschließend zu Jahresmittelwerten aggregiert. Für jedes Temperaturprofil wurde darüber hinaus die Schichtungsstabilität nach Schmidt [19] berechnet und für einen Grenzwert von 30 J/m^2 [20] der Beginn sowie das Ende der sommerlichen Stratifikationsperiode bestimmt. In diesen Daten ist ein deutliches Signal der globalen Klimaerwärmung erkennbar (Abbildung 2). Dieses manifestiert sich insbesondere in einem Anstieg der oberflächennahen Wassertemperaturen, welche im Sommer $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Dekade im Fall der Talsperren Saidenbach und Lichtenberg bzw. $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Dekade bei der Talsperre Eibenstock beträgt. Erkennbar ist außerdem eine Verlängerung der sommerlichen Schichtung um etwa 13 Tage pro Dekade in der Talsperre Eibenstock, elf Tage pro Dekade in der Talsperre Saidenbach und etwa neun Tage pro Dekade in der Talsperre Lichtenberg. Dabei kommt es sowohl zu einem früheren Start als auch zu einem späteren Ende der thermischen Schichtung. Für das Schichtungsende spielt die Bewirtschaftung ebenfalls eine wichtige Rolle, insbesondere die Menge der Regel- und Hochwasserabgaben sowie die Tiefe, aus der diese Abgaben während der Stagnationsphase realisiert werden. Verglichen mit anderen Seen und Talsperren weltweit sind die gefundenen Trends relativ stark ausgeprägt. Wie auch andere Studien zeigen diese Befunde, dass Seen und Talsperren in Gebirgsregionen und mit zeitweiser Eisbedeckung besonders empfindlich auf die Klimaerwärmung reagieren [3, 21].

Die Impaktmodelle zeigen auf, dass mit einem weiteren deutlichen Anstieg des Jahresmittelwertes der Wassertemperatur zu rechnen ist. Die verwendeten Modelle unterscheiden sich bezüglich der Anpassungsgüte, aber die berechneten Trends für die Talsperre sind konsistent. Dabei reagieren insbesondere die Oberflächentemperatur, die Schichtung sowie die Eisbedeckung stark. Für die Talsperre Lichtenberg ergeben die Simulationen unter dem verwendeten Klimaszenario einen Anstieg des Jahresmittels der Oberflächenwassertemperatur von $0,34 \pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Dekade sowie eine Verlängerung der Dauer der Sommerschichtung um etwa $3,2 \pm 0,6$ Tage pro Dekade (Abbildung 3). Die Wahrscheinlichkeit zur Bildung einer Eisdicke liegt entsprechend der Modellschätzung am Ende des Jahrhunderts bei knapp unter 25 %. Studien für die Talsperre Rappbode zeigen außerdem, dass in den pessimistischeren Klimaszenarien auch die hypolimnische Temperatur stark ansteigen könnte [22].

Anpassung an die Klimaerwärmung

Die von uns simulierten Anpassungsszenarien, welche die Entnahmetiefe der Wildbettabgabe variieren, zeigen, dass es möglich ist, den Einfluss der Klimaerwärmung zum Teil abzuschwächen. Die Größenordnungen der erzielten Effekte entsprechen dabei im Wesentlichen den Auswirkungen der Klimaerwärmung in den letzten 30 Jahren. Dies zeigt sich sowohl bei den

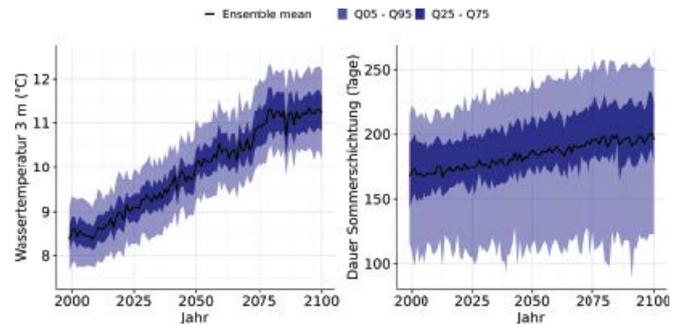


Abb. 3: Ergebnisse der Klimaimpaktsimulationen für das Jahresmittel der Wassertemperatur in 3 m Tiefe (links) und für die Dauer der Sommerstagnation (rechts). Die Wassertemperatur in 3 m Tiefe dient als Approximation für die epilimnische Wassertemperatur. Die Abbildungen zeigen jeweils den Mittelwert (schwarze Linie) sowie die Bereiche für die Quantile 25 % bis 75 % und 5 % bis 95 % aller Ensemble-Läufe.

drei realen Talsperren als auch im Falle der idealisierten Talsperre. Eine Wildbettabgabe aus höher gelegenen Schichten kann die Zunahme der hypolimnischen Wassertemperatur verringern, dies allerdings auf Kosten einer verlängerten Sommerstagnation. Wenn die verlängerte Sommerstagnation zu keinen weiteren Wassergüteproblemen führt, z.B. starker Sauerstoffschwund mit Eisen- und Manganfreisetzung im Tiefenwasser, kann eine epilimnische (oberflächennahe) Wildbettabgabe zur Mengentlastung des zur Trinkwassergewinnung bevorzugten hypolimnischen Wasservorrats beitragen, indem aus diesem qualitativ weniger hochwertiges Wasser an den unterliegenden Fluss abgeführt wird. Auch im Fall des Auftretens sommerlicher Hochwässer kann eine Hochwasserentlastung aus dem Epilimnion die Mengenbilanz des kalten Tiefenwassers wirksam entlasten (Abbildung 4).

Mithilfe statistischer Modelle konnten wir weitere Einflussgrößen für die thermische Struktur und Schichtung der Talsperren identifizieren sowie Einflussgrößen für die Wirksam-

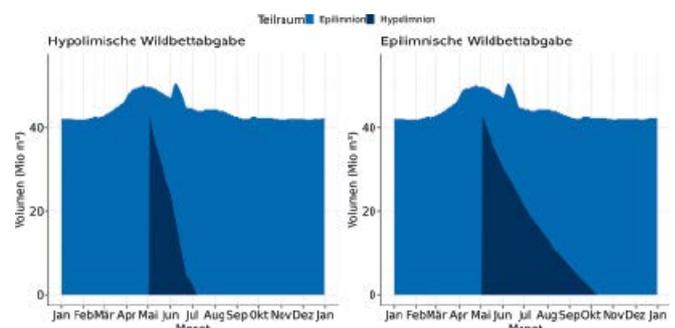


Abb. 4: Auswirkung verschiedener Wassermengenbewirtschaftung nach einem hypothetischen Sommerhochwasser auf die Entwicklung des Hypolimnionvolumens für eine idealisierte Talsperre in mittleren geografischen Breiten. Links mit Wildbettabgabe aus dem Grundablass und rechts mit oberflächennaher Wildbettabgabe. Der Wasserkörper wurde auf Höhe der 10°C Isotherme in Epi- und Hypolimnion getrennt. Infolge der aus tieferen Wasserschichten realisierten Hochwasserentlastung kommt es im linken Szenario zu einer frühzeitigeren Erschöpfung des hypolimnischen Wasservorrats.

keit der gewählten Entnahmestrategien aufzeigen. Die wichtigsten Größen sind: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Entnahmeraten und Gewässervolumen. Die statistische Auswertung zeigt auch, dass die Wirksamkeit des Entnahmetiefenmanagements von den spezifischen bautechnischen Gegebenheiten einer Talsperre abhängig ist. Insbesondere ist die Auswirkung auf die Sommerstagnation in Talsperren mit geringerem Volumen größer. Die Wirksamkeit des Entnahmetiefenmanagements auf die hypolimnische Wassertemperatur und den Startzeitpunkt der Herbstvollzirkulation hängt maßgeblich von der Menge des aus dem Hypolimnion abgegebenen Wassers in Relation zum Gewässervolumen ab.

Diskussion

Die Ergebnisse unserer Simulation für die Talsperre Lichtenberg entsprechen den Ergebnissen von Mi [22] für die Trinkwassertalsperre Rappbode unter dem moderat optimistischen RCP 6.0 Klimaszenario. Die beobachteten Trends der historischen Daten sind jedoch noch stärker und mit den Impaktsimulationen des pessimistischen Szenarios RCP 8.5 für die Rappbode-Talsperre vergleichbar. Sowohl die historischen Messdaten als auch die globale Betrachtung der Treibhausgasemissionen [23] deuten somit darauf hin, dass wir uns derzeit auf dem Pfad eines pessimistischeren Klimaszenarios wie z. B. RCP 8.5 befinden. Ähnliche Reaktionen auf ein sich erwärmendes Klima sind auch in anderen Talsperren zu beobachten [1, 2]. In jedem Fall stellen die Auswirkungen der Klimaerwärmung eine große Herausforderung für die Bewirtschaftung von Talsperren dar, da sie großen Einfluss auf Menge und Beschaffenheit des Rohwassers haben [4, 24]. Dabei sind für die Trinkwassergewinnung die Verlängerung der Sommerstagnation und der Anstieg der hypolimnischen Wassertemperatur besonders problematisch. Grund hierfür ist die längere Entkopplung des Tiefenwasserkörpers von der atmosphärischen Sauerstoffzufuhr und eine erhöhte Sauerstoffzehrung aufgrund schneller ablaufender biologischer Stoffumsetzungen.

Unsere Simulationen zur Anpassung der Entnahmetiefe konnten aufzeigen, dass es in einem begrenzten Rahmen möglich ist, negativen Auswirkungen der regionalen Klimaerwärmung entgegenzuwirken. Allerdings muss dabei stets eine Abwägung zwischen verschiedenen Gütekriterien z. B. der Wassertemperatur und der Schichtungsdauer sowie den Anforderungen des Hochwasserschutzes, der Niedrigwasseraufhöhung und der Energiegewinnung getroffen werden. In zukünftigen Studien sollten darüber hinaus weitere Gütekriterien berücksichtigt werden, z. B. Sauerstoffkonzentration, Trübung und Algenentwicklung.

Fazit

Der Klimawandel stellt eine große Herausforderung für Trinkwassertalsperren dar. Hydrophysikalische Seen- und Talsperrenmodelle können dazu beitragen, zukünftige Auswirkungen der Klimaerwärmung mit Hilfe regionalisierter Klimadaten zu prognostizieren und Bewirtschaftungsalternativen zu vergleichen.

Sowohl die Analyse historischer Messdaten als auch die Klimaimpaktsimulationen zeigen eine kohärente Reaktion von Talsperren auf die Klimaerwärmung. Zu erwarten sind steigende Wassertemperaturen, eine längere Sommerstagnation, eine

kürzere Dauer der Eisbedeckung und eine Verminderung der inversen Schichtung im Winter.

Durch einen Wechsel von hypolimnischer zu oberflächennaher Wildbettabgabe können Wassertemperatur und Dauer der Sommerstagnation beeinflusst werden. Es gibt jedoch keine universell-optimale Strategie für alle Talsperren, um gleichzeitig einen Anstieg der Wassertemperatur zu begrenzen und die Dauer der Sommerschichtung zu verkürzen. Durch eine angepasste Bewirtschaftung könnte z. B. der Anstieg der Wassertemperatur im Hypolimnion begrenzt werden, wobei jedoch im Gegenzug die Dauer der Sommerstagnation zunehmen würde. In den vorliegenden Simulationen wurden bisher keine biologischen oder chemischen Größen explizit berücksichtigt. In der Literatur beschriebenen Studien legen aber nahe, dass sich Änderungen von Schichtung und Temperatur auch auf die Wassergüte auswirken. Eine stärkere Schichtung kann zu anoxischen Bedingungen im Hypolimnion führen [25], zusätzlich führen Änderungen von Temperatur und Schichtung zu Verschiebungen in der Phytoplanktongemeinschaft [4, 26].

Viele Talsperrenbetreiber in Deutschland passen ihre Bewirtschaftungsstrategien bereits an, aber die Möglichkeiten zur lokalen Adaption sind begrenzt, während die Klimaerwärmung immer schneller voranschreitet. Eine globale Strategie zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist daher auch mit Blick auf die Trinkwasserversorgung dringend notwendig.

Dank

Wir bedanken uns bei der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen für die Bereitstellung der Daten. Außerdem, danken wir Uta Reader und Lothar Paul für ihre konstruktive

Anzeige

Unser Expertentipp

		
DWA-M 1002	DWA-Themen T2/2014	Fachbuch
Anforderungen an die Qualifikation und Organisation von Stauanlagenbetreibern Dezember 2022 22 Seiten, A4 40,00 € / 32,00 €* Kombi E-Book & Print 52,00 € / 41,60 €*	Anpassungsstrategien für Stauanlagen an den Klimawandel Juni 2014 84 Seiten, A4 88,50 € / 70,80 €* Kombi E-Book & Print 115,00 € / 92,00 €*	Betrieb und Sanierung von Talsperren Weiterbildendes Studium 'Wasser und Umwelt' Bauhaus-Universität Weimar 2009, 352 Seiten, A4 50,00 €
* für fördernde DWA-Mitglieder ** für DWA-Mitglieder		

tiven Hinweise. Johannes Feldbauer hat ein Stipendium des Europäischen Sozialfonds erhalten und seine Arbeit wird mitfinanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes. Johannes Feldbauer, Thomas Petzoldt und Thomas Berendonk erhalten Mittel aus dem Projekt KlimaKonform welches Teil der BMBF Maßnahme FKZ 01LR 2005A – Fördermaßnahme „Regionale Informationen zum Klimahandeln“ (RegIKlim) ist.

Literatur

- [1] Jäschke K, Sachse R, Petzoldt T, et al. *Wie zeigt sich der Klimawandel in den deutschen Talsperren?* WASSERWIRTSCHAFT 2013; 5: 32–35
- [2] Wilmitzer H, Jäschke K, Paul L, et al. *Einfluss von Klimaänderungen auf die Wasserqualität von Talsperren und Strategien zur Minimierung der Auswirkungen.* DVGW energie|wasser-praxis 2015; 84–88
- [3] O'Reilly CM, Sharma S, Gray DK, et al. *Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe.* Geophys Res Lett 2015; 42: 10,773–10,781. doi:10.1002/2015GL066235
- [4] Horn H, Paul L, Horn W, et al. *Climate change impeded the re-oligotrophication of the Saldenbach Reservoir.* Internat Rev Hydrobiol 2015; 100: 43–60. doi:10.1002/iroh.201401743
- [5] Paerl HW, Huisman J. *Blooms Like It Hot.* Science 2008; 320: 57–58. doi:10.1126/science.1155398
- [6] Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren. *Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren gemäß DIN 19700.* Oldenbourg Industrieverlag; 2009
- [7] Mi C, Sadeghian A, Lindenschmidt K-E, et al. *Variable withdrawal elevations as a management tool to counter the effects of climate warming in Germany's largest drinking water reservoir.* Environ Sci Eur 2019; 31: 19. doi:10.1186/s12302-019-0202-4
- [8] Saltelli A, Bammer G, Bruno I, et al. *Five ways to ensure that models serve society: a manifesto.* Nature 2020; 582: 482–484. doi:10.1038/d41586-020-01812-9
- [9] Thomas RQ, Figueiredo RJ, Daneshmand V, et al. *A Near-Term Iterative Forecasting System Successfully Predicts Reservoir Hydrodynamics and Partitions Uncertainty in Real Time.* Water Resour Res 2020; 56: e2019WR026138. doi:10.1029/2019WR026138
- [10] Moore TN, Mesman JP, Ladwig R, et al. *LakeEnsemblR: An R package that facilitates ensemble modelling of lakes.* Environ Model Softw 2021; 143: 105101. doi:10.1016/j.envsoft.2021.105101
- [11] Mironov D. *Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model.* Offenbach am Main, Germany: Deutscher Wetterdienst; 2008
- [12] Hipsey MR, Bruce LC, Boon C, et al. *A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON).* Geosci Model Dev 2019; 12: 473–523. doi:10.5194/gmd-12-473-2019
- [13] Burchard H, Bolding K, Ruiz-Villarreal M. *GOTM, a general ocean turbulence model. Theory, implementation and test cases.* Space Applications Institute; 1999
- [14] Goudsmit G-H, Burchard H, Peeters F, et al. *Application of k-ε turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches.* J Geophys Res 2002; 107: 23-1-23–13. doi:10.1029/2001JC000954
- [15] Saloranta TM, Andersen T. *MyLake—A multi-year lake simulation model code suitable for uncertainty and sensitivity analysis simulations.* Ecol Modell 2007; 207: 45–60. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.03.018
- [16] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Core Writing Team, Pachauri, RK and Reisinger, A (eds)] IPCC, Geneva, Switzerland 2007; 104 pp
- [17] Feldbauer J, Ladwig R, Mesman JP, et al. *Ensemble of models shows coherent response of a reservoir's stratification and ice cover to climate warming.* Aquat Sci 2022; 84: 50. doi:10.1007/s00027-022-00883-2
- [18] Feldbauer J, Kneis D, Hegewald T, et al. *Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies.* Environ Sci Eur 2020; 32: 48. doi:10.1186/s12302-020-00324-7
- [19] Schmidt W. *Über die Temperatur- und Stabilitätsverhältnisse von Seen.* Geografiska Annaler 1928; 10: 145–177. doi:10.1080/20014422.1928.11880475
- [20] Engelhardt C, Kirillin G. *Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements.* Fundam Appl Limnol 2014; 184: 183–194. doi:10.1127/1863-9135/2014/0582
- [21] Wagner A, Hülsmann S, Paul L, et al. *A phenomenological approach shows a high coherence of warming patterns in dimictic aquatic systems across latitude.* Mar Biol 2012; 159: 2543–2559. doi:10.1007/s00227-012-1934-5
- [22] Mi C, Shatwell T, Ma J, et al. *Ensemble warming projections in Germany's largest drinking water reservoir and potential adaptation strategies.* Sci Total Environ 2020; 748: 141366. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141366
- [23] Schwalm CR, Glendon S, Duffy PB. *RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions.* PNAS 2020; 117: 19656–19657. doi:10.1073/pnas.2007117117
- [24] Woolway RI, Kraemer BM, Linters JD, et al. *Global lake responses to climate change.* Nat Rev Earth Environ 2020; 1: 388–403. doi:10.1038/s43017-020-0067-5
- [25] Zhang Y, Wu Z, Liu M, et al. *Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China).* Water Res 2015; 75: 249–258. doi:10.1016/j.watres.2015.02.052
- [26] Peeters F, Straile D, Lorke A, et al. *Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate.* Glob Chang Biol 2007; 13: 1898–1909. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01412.x

Autoren

Johannes Feldbauer, M. Sc.
Technische Universität Dresden, Fachrichtung Hydrowissenschaften
Institut für Hydrobiologie
01062 Dresden

E-Mail: johannes.feldbauer@tu-dresden.de

Dr. Tilo Hegewald
Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
Referat Wassergüte
Bahnhofstraße 14
01796 Pirna

E-Mail: Tilo.Hegewald@ltv.sachsen.de

Prof. Dr. Thomas U Berendonk
Technische Universität Dresden, Fachrichtung Hydrowissenschaften
Institut für Hydrobiologie
01062 Dresden

E-Mail: thomas.berendonk@tu-dresden.de

Dr. Thomas Petzoldt
Technische Universität Dresden, Fachrichtung Hydrowissenschaften
Institut für Hydrobiologie
01062 Dresden

E-Mail: thomas.petzoldt@tu-dresden.de

