

I. Basisinformation	
Ansprechpartner	<p>LfULG Ref.55, Fachzentrum Klima FachzentrumKlima.lfulg@smekul.sachsen.de</p> <p>Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen Fachbereich Wasserwirtschaft – Referat Wassergüte Dr. Tilo Hegewald <i>Funktionspostfach: FB2@ltv.sachsen.de</i></p>
Letzte Aktualisierung:	07/24
Fortschreibungszyklus:	alle zwei Jahre
Interne Nummer: I-WW6	Auswirkung des Klimawandels in sächsischen Talsperren auf ausgewählte Wasserqualitätsmerkmale
Kurzbeschreibung und Einheit:	<p>1) Zeitpunkt des Eisaufruchs und Beginn der Sommerstagnationsperiode Der Eisaufruch wird als der Termin definiert, an dem die Talsperre im Frühjahr letztmalig zu mehr als 50 % eisbedeckt war. Überschreitet im Frühjahr die Oberflächentemperatur dauerhaft 10°C, beginnt die Sommerstagnation (Ausbildung einer stabilen thermischen Schichtung, die durch konvektive Prozesse und die Wirkung des Windes nicht mehr aufgehoben werden kann).</p> <p>2) Mittlere Wassertemperatur des sommerlichen Epilimnions Mittlere Temperatur in 3 m Wassertiefe, welche im Sommer (Juni bis September) für die mittlere Temperatur des Epilimnions repräsentativ ist. Die Tiefe liegt während der Sommerstagnation im Epilimnion und wird von temporären Schichtungsphänomenen sowie kurzfristigen wetterbedingten Schwankungen weniger beeinflusst als bspw. die in Fernerkundungsstudien oft verwendeten Wassertemperaturen an der Gewässeroberfläche (z.B. De Santis et al. 2022).</p>
Berechnungsvorschrift:	<p>1) Eisaufruch und Sommerstagnationsbeginn: jährliche Terminwerte einschließlich Strukturbruchanalyse entsprechend Zeileis et al. (2002), Bai & Perron (2003).</p> <p>2) Epilimiontemperatur: jährlich saisonale Mittelwerte (Juni bis September) einschließlich Mann-Kendall-Trendtest entsprechend Hirsch et al. (1982)</p>
Interpretation des Indikatorwertes:	<p>1) Eisaufruch/Sommerstagnationsbeginn: Der Indikator gibt Auskunft über die Witterungssituation im Winterhalbjahr und Frühling, welchen wesentlichen Einfluss auf gewässerökologische Prozesse haben. Der Zeitpunkt des Eisaufruchs steht in enger Beziehung mit anderen synoptischen Klimaindikatoren, bspw. der Nordatlantischen Oszillation. Er bestimmt Beginn und Dauer von Frühjahrsvollzirkulation und Frühjahrsinstabilität (fluktuierender Wechsel zwischen kurzen Schichtungs- und Durchmischungsphasen in Abhängigkeit von der Witterungssituation). Milde Winter und frühzeitige Eisaufrüche bedingen in der Regel eine längere Dauer der Vollzirkulation und Frühjahrsinstabilität.</p> <p>2) Mittlere Wassertemperatur des sommerlichen Epilimnions:</p>

	Das Temperaturmittel im Zeitraum von Juni bis September in 3 m Wassertiefe zeigt an, wie stark sich das Epilimnion (die erwärmte oberflächennächste Schicht in einem Standgewässer) während des Sommerhalbjahres aufheizt.
II. Einordnung	
DPSIR	Impact
Handlungsfeld:	Wasserwirtschaft
Themenfeld:	Talsperren
Klimawirkung:	<p>Der Klimawandel äußert sich in global steigenden Lufttemperaturen. Damit einhergehend kommt es in Seen und Talsperren zum Anstieg der Wassertemperaturen und zu Veränderungen des Durchmischungs- und Schichtungsverhalten, verkürzten oder ausfallenden Eisbedeckungsphasen und unter Umständen verlängerten Stagnationsphasen im Sommerhalbjahr. Auch sind dadurch generelle Veränderungen des thermischen Schichtungstyps (dimiktisch zu monomiktisch) möglich.</p> <p>Ebenso sind Veränderungen biotischer Faktoren wie zeitliche Verschiebungen von Entwicklungszyklen des Phyto- und Zooplanktons, der Wirbellosen und Fische beobachtet worden. Daher haben nicht nur direkte Temperatureffekte, sondern sogar auch in stärkerem Maße, indirekte Folgen der Klimaerwärmung Einfluss auf die Wassergüte von Standgewässern. Die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen zeigen dabei Parallelen zur großräumigen anthropogen verursachten Eutrophierung zahlreicher Gewässer in den 1970er und 1980er Jahren. Trotz einer starken Reduzierung der Nährstoffeinträge infolge der nach 1990 stattgefundenen sozio-ökonomischen Veränderungen kam es in zahlreichen Gewässern</p> <ul style="list-style-type: none"> • zur Zunahme des Phytoplanktonbiomasse, • dem Aufkommen/der Dominanz unerwünschter Cyanobakterien und/oder • zu längeren Perioden mit Sauerstoffmangel im Meta- und/oder Hypolimnion. <p>Letzterer forciert darüber hinaus die unerwünschte Freisetzung und Akkumulation reduktiver Substanzen aus dem Sediment (bspw. Mangan und Ammonium), die neben den vorab aufgeführten Eutrophierungseffekten im Falle von Trinkwassertalsperren vor allem Mehraufwendungen im Wasseraufbereitungsprozess bedeuten können.</p> <p>Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Faktoren für die Struktur und Funktion von aquatischen Ökosystemen. Sie beeinflusst die Geschwindigkeit und Gleichgewichtslage (bio-)chemischer Reaktionen, die Löslichkeit von Gasen, die Lebensraumverfügbarkeit sowie den Zeitpunkt und die Dauer phänologischer Ereignisse. Nicht zuletzt nimmt sie Einfluss auf das Auftreten von (oftmals toxischen) Cyanobakterien und den Etablierungserfolg invasiver Neobiota.</p> <p>Wassertemperatur und Schichtungsverhalten sind vor diesem Hintergrund aussagekräftige Indikatoren, welche u.a. auch eine Bewertung der zu erwartenden Veränderungen der Wasserbeschaffenheit ermöglichen.</p>

<p>Limitation des Indikators:</p>	<p>Die hier getroffenen Aussagen und Darstellungen basieren auf Daten, die im Rahmen des seit 1975 an der im Unteren Osterzgebirge gelegenen Talsperre Saidenbach durchgeführten Langzeitmonitorings durch die Sächsische Akademie der Wissenschaften, die Technische Universität Dresden (Ökologische Station Neunzehnhain) und die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen erhoben wurden (Horn et al. 2006, Horn et al. 2015, Hegewald 2023).</p> <p>Die Talsperre Saidenbach erfüllt alle erforderlichen Voraussetzungen, um für die auf tiefmontaner Höhenstufe im feuchtgemäßigten Klima der mittleren Breiten gelegenen Mittelgebirgstalsperren dimiktischen Schichtungstyps mit vergleichsweise kurzer Verweilzeit (unterjähriger Wasserspeicher) als Referenz- und Modellgewässer zu fungieren.</p> <p>Die Wasserbeschaffenheit wird regionalspezifisch, saisonal verschieden vom Klimawandel beeinflusst. Obgleich Auswirkungen klimawandelinduzierter Effekte auf die chemisch physikalische sowie biotische Struktur in zahlreichen Trinkwassertalsperren Deutschlands durchaus ähnlich ausfallen (Jäschke et al. 2013, 2018, Paul et. al 2013), sind sie je nach Gewässer dennoch individuell und können deutlich voneinander abweichen. Grund hierfür ist unter anderem die Tatsache, dass auf den Klimawandel zurückzuführende Effekte sowohl von den geografischen Koordinaten, von der Höhenlage sowie von der Gewässergröße (Volumen und Oberflächen) beeinflusst werden (Paul et. al 2013, Petzoldt et al. in prep.). Hinzu kommen unterschiedliche Einzugsgebietsstrukturen und Nutzungen, sowie talsperrenspezifische Bewirtschaftungsstrategien (z.B. Feldbauer et al. 2020). Eine generalisierte, direkte Übertragbarkeit physikalischer, chemischer bzw. biologischer Zusammenhänge ist demzufolge zwischen regional (sehr) unterschiedlich gelegenen Gewässern unterschiedlicher Charakteristik nur eingeschränkt und in einigen Fällen kaum möglich.</p>
III. Bezüge	
<p>Referenz auf andere Indikatoren-system (z.B. DAS, LIKI):</p>	<p>Wasserentnahme der öffentlichen Wasserversorgung LANUV Klima (nrw.de)</p>
<p>Fachpolitischer Bezug (z.B. EKP)</p>	<p>Energie und Klimaprogramm Sachsen 2021 Kapitel 7.1 Handlungsprogramm „Zukunft Wasser für Sachsen“ 2024 Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)</p>
<p>Inhaltlicher Bezug:</p>	<p>Jährlicher Geschäftsbericht</p>
IV. Technische Informationen	
<p>Datenquelle:</p>	<p>LTV-Messnetz</p>
<p>Räumliche Auflösung:</p>	<p>punktuell</p>
<p>Geographische Abdeckung:</p>	<p>Talsperre Saidenbach</p>
<p>Zeitliche Auflösung:</p>	<p>Eisaufbruch/Sommerstagnationsbeginn: jährliche Werte Epilimiontemperatur: jährlich saisonale Mittelwerte (Juni bis September)</p>
<p><i>Beschränkungen, Datenkosten:</i></p>	<p><i>keine</i></p>
<p>Weiterentwicklung/Ausblick:</p>	<p>Mittelfristig erfolgt die Erarbeitung von Projektionsdaten mit Hilfe von Ensemble-Modellierungen (Hydrodynamik) an ausgewählten Talsperren (z.B. Feldbauer et al. 2022, 2023). Diese können perspektivisch ergänzende Informationen liefern.</p>
V. Auswertung und Darstellung	

Kernaussage/Schlüsselsatz:	In Folge steigender Lufttemperaturen kommt es neben dem Anstieg der oberflächennahen Wassertemperaturen zu veränderten saisonalen Durchmischungs- und Schichtungsverhältnissen, einer verkürzten Eisbedeckung im Winterhalbjahr sowie einer frühzeitiger beginnenden Sommerstagnation.
Ausführliche Beschreibung der Ergebnisse:	<p>1) Eis aufbruch/Sommerstagnationsbeginn: Obgleich seit Ende der 1980er Jahre in Europa tendenziell wärmere Winter und damit einhergehend kürzere oder gar ausbleibende Eisbedeckungsphasen beobachtet werden, ist die Talsperre Saldenbach aufgrund ihrer Höhenlage nach wie vor, mit Ausnahme des Jahres 2007, (noch) regelmäßig eisbedeckt. Als Folge des fortschreitenden Klimawandels, der sich in Mitteleuropa unter anderem in tendenziell höheren Lufttemperaturen des Winterhalbjahres bemerkbar macht, zeigt der Eis aufbruch eine zeitliche Vorverlagerung bei zunehmend stärkeren Schwankungen. Der Zeitreihenbruchpunkt („regime shift“) liegt im Jahr 1988/89 (Abb. 1).</p> <p>Mit dem Jahr 1989 begann eine bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt anhaltende Serie von Jahren mit überdurchschnittlich warmen, kurzen Wintern. Neben kürzeren Eisbedeckungsphasen wurden ein signifikanter Anstieg der Wassertemperaturen im Frühjahr, sowie längere Vollzirkulationsphasen beobachtet, die einen frühzeitigeren Beginn der sommerlichen Stagnationsperiode zur Folge hatten.</p> <p>Durch diesen Umstand kam es zu einer Intensivierung des Phytoplanktonwachstums im Frühjahr (Ergebnisse nicht gezeigt). Der Grund hierfür wird vor allem in ab diesem Zeitpunkt veränderten Unterwasserlicht- und Durchmischungsverhältnissen gesehen. Aufgrund der frühzeitiger stattfindenden Eis aufbrüche ist eine effektivere Ausnutzung des Nährstoffpools bei verringerten Sedimentationsverlusten durch das Phytoplankton ermöglicht. Nicht zuletzt kam es zu einer strukturellen Veränderung in der Artenzusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaft infolge der veränderten Bedingungen.</p> <p>2) Epilimniontemperatur: Auch im Sommer werden seit Ende der 1980er-Jahre tendenziell steigende Lufttemperaturen registriert. Diese führten zu einer deutlichen Zunahme der oberflächennahen (epilimnischen) Wassertemperaturen (0,75 K pro Dekade, siehe Abb. 2).</p> <p>Gleichzeitig gingen nach 1990 die Rohwasserabgabemengen – welche in der Regel aus dem (kalten) Tiefenwasserkörper erfolgen – deutlich zurück, was sich im Vergleich zu früher durch eine geringere Zunahme der Epilimnionmächtigkeit und niedrigeren Hypolimniontemperaturen widerspiegelt.</p> <p>Diese Veränderungen führten zu einer deutlichen Erhöhung der Schichtungsstabilität des gesamten Wasserkörpers, insbesondere aber der oberen Wasserschichten (Reduzierung der windinduzierten turbulenten Durchmischung), was auch für die Zusammensetzung und das Wachstum der sommerlichen Phytoplanktongemeinschaft Folgen hatte.</p>

Zum Vergleich ist die mittlere Epilimniontemperatur der Talsperre Bautzen (im Oberlausitzer Heide- und Teichgebiet gelegen) – ein zur Polymixie neigendes Flachgewässer mit großer Oberfläche (hohe Windexposition) – für den gleichen Zeitraum dargestellt. Die zeitliche Änderung ihrer mittleren Epilimniontemperatur steht mit $0,8 \text{ K/Dekade}$ in Analogie zur am Beispiel der Talsperre Saidenbach festgestellten.

Abbildung des Indikators im Monitoringbericht

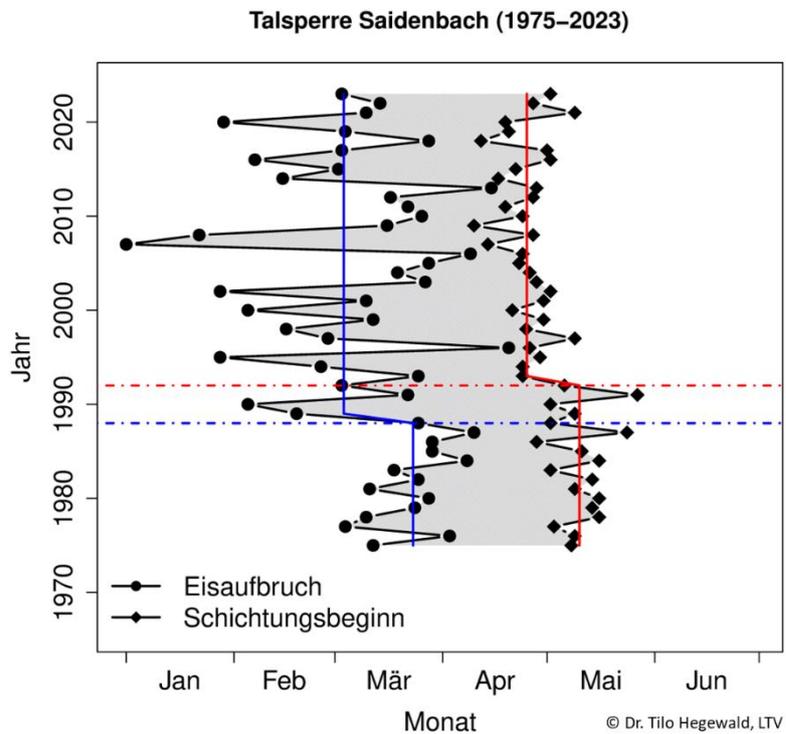


Abbildung 1. Eisauflauf und Beginn der sommerlichen Stagnationsphase an der Talsperre Saidenbach im Zeitraum von 1975 bis 2023 sowie die Zeitreihen statistisch ermittelten Strukturbrüche (gestrichelte farbige Linien) und aus den Strukturbruchmodellen abgeleitete mittlere zeitliche Verläufe (farbige Linien) für Eisauflauf und Schichtungsbeginn.

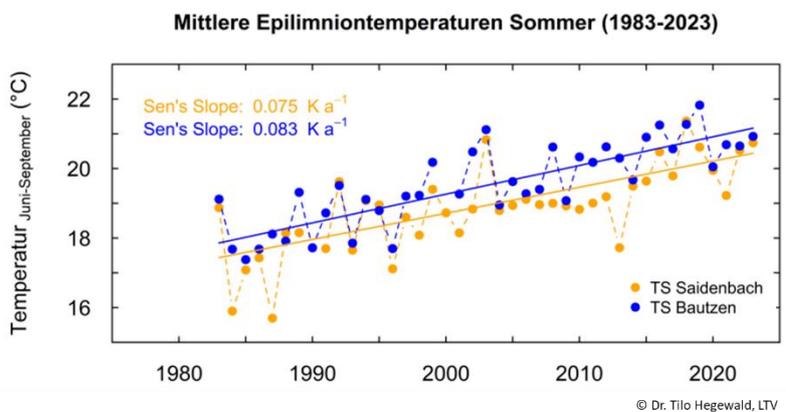


Abbildung 2. Zeitlicher Verlauf der Epilimniontemperaturen der Talsperren Saidenbach und Bautzen im Sommer (Juni bis September) im Zeitraum von 1985 bis 2023 (einschließlich Teil-Sen-Trendlinien und deren Anstieg [Sen's Slope]).

Trendauswertung:

*Tabelle 1: Ende der Winterstagnation (Zeitpunkt des Eisaufbruchs) und Beginn der Sommerstagnation an der Talsperre Saidenbach (julianischer Tag im Jahr, anhand der mittels Strukturbruchanalyse detektierten Zeitabschnitte abgeleitet, vgl. **Abb. 1**).*

Zeitraum	Ende Winterstagnation	Beginn Sommerstagnation
1975-1990	Tag 84	Tag 131
1991-2023	Tag 66	Tag 116

Die festgestellten Trends mit einer dekadischen Erhöhung der Epilimniontemperaturen um 0,75 K und 0,8 K an den Talsperren Saidenbach und Bautzen sind signifikant (Kendall's Tau = 0,59 für die Talsperre Saidenbach, $p < 0,01$ bzw. Kendall's Tau = 0,65 und $p < 0,01$ für die Talsperre Bautzen). Setzen sich diese so fort, sind weitere Änderungen hinsichtlich Schichtungsdynamik und damit einhergehenden Folgen zu erwarten, die sich auf die Wasserbereitstellung auswirken können.

VI. Zusatz-Informationen

Weiterführende Informationen / Literatur:

1. Feldbauer, J., Ladwig, R., Meman, J.P., Moore, T.N., Zündorf, H., Berendonk, T.U. & T. Petzold (2022): Ensemble of models shows coherent response of a reservoir's stratification and ice cover to climate warming. *Aquatic Science* 84: 50, doi: 10.1007/s00027-022-00883-2
2. Feldbauer, J., Hegewald, T., Berendonk, T.U. & T. Petzoldt (2023): Nicht nur Temperatur – wie der Klimawandel Trinkwassertalsperren beeinflusst. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 16 (4): 244-248, doi: 10.3243/kwe2023.04.003
3. Hegewald, T. (2023): Vier Jahrzehnte Langzeituntersuchungen an der Talsperre Saidenbach – Wasserbeschafftheitsentwicklung im gesellschaftlichen und klimatischen Wandel. Bericht zur Fortführung des Langzeitdatensatzes der Talsperre Saidenbach im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V., Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. 113 S.
4. Feldbauer, J., Kneis, D., Hegewald, T., Berendonk, T.U. & T. Petzoldt (2020): Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies. *Environ. Sci. Eur.* 32: 48. doi:10.1186/s12302-020-00324-7
5. Jäschke, K., Hegewald, T., Berendonk, T. U., Petzoldt, T., Sachse, R., Wagner, A. & L. Paul (2013): Klimawandel in Talsperren - Datenerfassung und erste Auswertung. Bericht im Auftrag der ATT zum Thema „Erfassung von Datensätzen als Grundlage für eine Studie zum Einfluss des Klimawandels auf die physikalische Struktur und den Wasserhaushalt von Trinkwassertalsperren in Deutschland“, 73 S.
6. Paul, L., Jäschke, K., Hegewald, T., Sachse, R. & T. Petzoldt (2013): Regional patterns and long-term trends of air temperature and surface temperature of drinking water reservoirs in Germany. Vortrag Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie e.V., Potsdam
7. Jäschke, K. & L. Paul (2018). Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Gewässergüte von Trinkwassertalsperren. Bericht im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. 80 S.

	<ol style="list-style-type: none"> 8. Bai, J. & P. Perron (2003): Computation and analysis of multiple structural change models. <i>Journal of Applied Econometrics</i> 18: 1-22 9. Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K. & C. Kleiber (2002): Strucchange: an R package for testing for structural change in linear regression models. <i>Journal of Statistical Software</i> 7: 1-38 10. Hirsch, R.M., Slack, J.R. & R.A. Smith (1982): Techniques of trend analysis for monthly water quality data. <i>Water Resources Research</i>, v. 18, no. 1, p. 107–121 11. Horn, W., Horn, H., Paul, L. & I. Röske (2006): Drei Jahrzehnte kontinuierliche Forschung an der Talsperre Saldenbach. Fakten-Zusammenhänge-Trends. Abschlussbericht zum Projekt „Langzeitstabilität der biologischen Struktur von Talsperren-Ökosystemen“ der Arbeitsgruppe „Limnologie von Talsperren“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Verlag Dr. Uwe Miersch, Oßling, Germany, 179 S. 12. Horn H., Paul L., Horn W., Uhlmann D. & I. Röske (2015): Climate change impeded the re-oligotrophication of the Saldenbach Reservoir. <i>International Review of Hydrobiology</i> 100: 43 – 60, https://doi.org/10.1002/iroh.201401743 13. De Santis, D., Del Frate, F. & G. Schiavon (2022): Analysis of climate change effects on surface temperature in Central-Italy lakes using satellite data time-series. <i>Remote Sensing</i>, 14(1). https://doi.org/10.3390/rs14010117 14. Petzoldt, T. Hegewald, T., Jäschke, K., Feldbauer, J., Berendonk, T.U. & L. Paul (in prep.): Temperaturtrends in Trinkwassertalsperren – Lassen sich Langzeituntersuchungen verallgemeinern?
Glossar:	<p><u>Synoptik, synoptische Meteorologie</u>, Bezeichnung für das Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Zusammenschau der an verschiedenen Orten zeitgleich durchgeführten Wetterbeobachtungen in kleinem, meist globalem oder hemisphärischem Maßstab beschäftigt. (Spektrum online – Biologielexikon)</p> <p>dimiktisch [von griech. di- = zwei-, miktos = gemischt], Bezeichnung für den Zirkulationstyp eines temperierten Sees/einer temperierten Talsperre der gemäßigten Zone, bei dem im Herbst und im Frühjahr (<u>Frühjahrszirkulation</u>) die gesamte Wassermasse durchmischt wird. (Spektrum online - Biologielexikon; siehe auch monomiktisch und polymiktisch)</p>