

I-Ww-6 Jahreszeitliches Schichtungsverhalten

Basisinformationen

Inhalt	Auswirkung des Klimawandels in sächsischen Talsperren auf ausgewählte Wasserqualitätsmerkmale
Klimawirkung	Mit steigenden Lufttemperaturen einhergehend kommt es in Seen und Talsperren auch zum Anstieg der Wassertemperaturen und Veränderungen des Durchmischungs- und Schichtungsverhalten. Resultierend daraus wurden Veränderungen in: verkürzten oder ausfallenden Eisbedeckungsphasen, verlängerten Stagnationsphasen im Sommerhalbjahr und der zeitlichen Verschiebungen von Entwicklungszyklen des Phyto- und Zooplanktons, sowie der Wirbellosen und Fische beobachtet. Direkt und indirekt beeinflussen diese Auswirkungen der Klimaerwärmung dadurch die Wassergüte von Standgewässern.

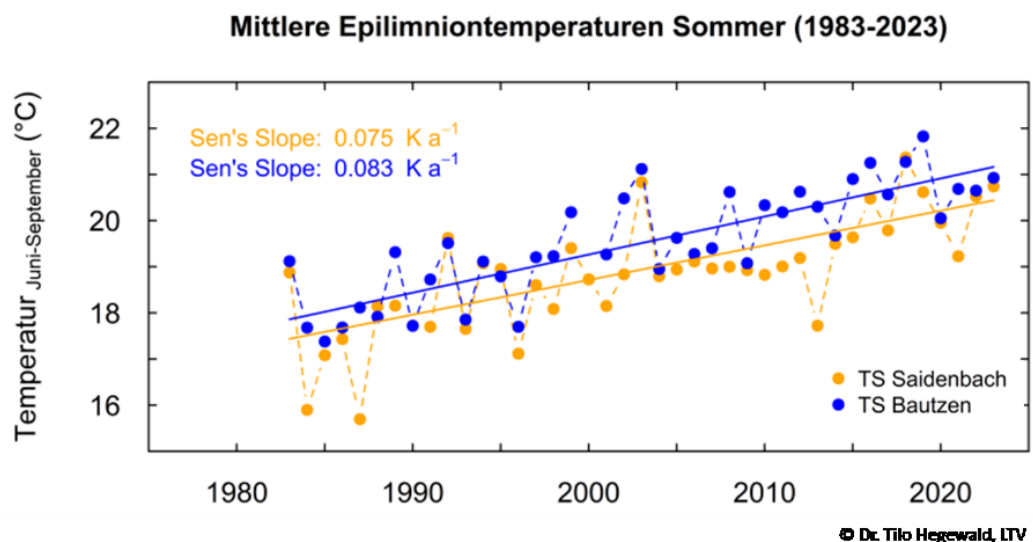
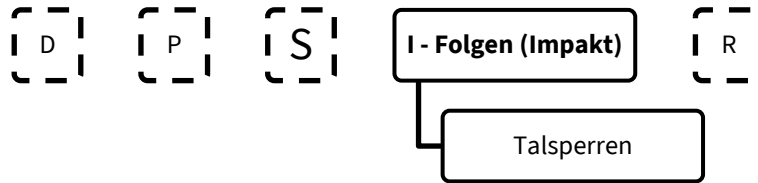


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Epilimniontemperaturen der Talsperren Saidenbach und Bautzen im Sommer (Juni bis September) im Zeitraum von 1985 bis 2023 (einschließlich Theil-Sen-Trendlinien und deren Anstieg [Sen`s Slope]).

Inhaltsbeschreibung	An der Talsperre Saidenbach werden langjährig Temperaturverlauf, Eisbedeckungsphasen und Sommerstagnation beobachtet. Dort zeigen sich die Zusammenhänge von steigender Temperatur und Veränderungen in der jahreszeitlichen Schichtung und Durchmischung. Seit den 1980-iger Jahren stieg die sommerliche Epilimniontemperatur um 0,75 K pro Dekade (Abbildung 1).
Befund	Der winterliche Eisaufruch erfolgt tendenziell eher und die Epilimniontemperaturen an den Talsperren steigt stetig.
Inhaltlicher Rahmen	Sächsisches Klimafolgenmonitoring (Klimaentwicklung in Sachsen - Klima - sachsen.de)
Weitere Indikatoren im Handlungsfeld	I-Ww-1 Standardisierter Grundwasserindex, I-Ww-2 Grundwasserneubildung, I-Ww-5 Betriebsraumfüllstände

Einordnung und Systematik



DPSIR-Schema

Präambel	Es besteht die Möglichkeit von inhaltlichen und methodischen Abweichungen der Indikatoren im sächsischen Klimafolgenmonitoring von denen anderer Monitoringsysteme. Grund dafür sind unter anderem die Indikatorherleitung und die verwendete Datengrundlage. Entsprechende Indikatoren sind dadurch nur bedingt mit denen anderer Monitoringsysteme vergleichbar.
Bund	<u>WW-I-8 Wassertemperatur von Seen (Monitoring der deutschen Anpassungsstrategie (DAS Monitoring))</u> Länderinitiative Kernindikatoren → kein Indikator
Andere Bundesländer	I-WW-6 Wassertemperatur stehender Gewässer (<u>Zweiter Monitoringbericht Thüringen LUBN</u>) I-WW-7 + 8 Stagnationsperiode und Eisaufbruch an Talsperren (<u>Zweiter Monitoringbericht Thüringen LUBN</u>)
Sachsen	Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2021 Maßnahmeplan zur Umsetzung des EKP 2021, Nummer 9.03 Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)
Thematischer Bezug	Jährlicher Geschäftsbericht der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen

Materialien und Methoden

Indikator	Zeitpunkt des Eisaufbruchs als Tag im Jahr Beginn der Sommerstagnationsperiode als Tag im Jahr Mittlere Wassertemperatur des sommerlichen Epilimnions in °C (Grad Celsius)
Berechnungsvorschrift	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. Die Aussagen und Darstellungen basieren auf Daten, die im Rahmen des seit 1975 an der im Unteren Osterzgebirge gelegenen Talsperre Saidenbach durchgeführten Langzeitmonitorings gewonnen wurden. <u>Eisaufbruch und Sommerstagnationsbeginn:</u> Der Eisaufbruch 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). Jährliche Terminwerte einschließlich Strukturbruchanalyse entsprechend Zeileis et al. (2002), Bai & Perron (2003) ermittelt. <u>Mittlere Wassertemperatur des sommerlichen Epilimnions:</u> Das Temperaturmittel im Zeitraum von Juni bis September in 3 Metern Wassertiefe zeigt an, wie stark sich das Epilimnion (die erwärmte Oberflächenschicht in

einem Standgewässer) während des Sommerhalbjahres aufheizt. Jährlich saisonale Mittelwerte (Juni bis September) einschließlich Mann-Kendall-Trendtest entsprechend Hirsch et al. (1982) ermittelt.

Einschränkungen in der Interpretierbarkeit

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), 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, Feldbauer et al. 2023). Hinzu kommen unterschiedliche Einzugsgebietsstrukturen und Nutzungen, sowie talsperrenspezifische Bewirtschaftungsstrategien. 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.

Datengrundlage	LTV-Messnetz, punktuell, Talsperre Saidenbach, Talsperre Bautzen
Zeitliche Auflösung	Eisaufbruch/Sommerstagnationsbeginn: jährliche Werte Epilimiontemperatur: jährlich saisonale Mittelwerte (Juni bis September)
Datenverfügbarkeit	Datenausgabe auf Anfrage
Ausblick	Langfristig erfolgt die Erarbeitung von Projektionsdaten mit einer Ensemble-Modellierungen (Hydrodynamik) an ausgewählten Talsperren (siehe beispielsweise Feldbauer et al. 2023). Diese können perspektivisch ergänzende Informationen liefern.

Auswertung und Darstellung

Befund	Der winterliche Eisaufbruch erfolgt tendenziell eher und die Epilimniontemperaturen an den Talsperren steigt stetig.
Ergebnisbeschreibung	<u>Eisaufbruch/Sommerstagnationsbeginn:</u> Der Indikator gibt Auskunft über die Witterungssituation im Winterhalbjahr und Frühling, welchen wesentlichen Einfluss auf gewässerökologische Prozesse haben. Der Zeitpunkt des Eisaufbruchs steht in enger Beziehung mit anderen synoptischen Klimaindikatoren beispielsweise der Nordatlantischen Oszillation. Beginn, Dauer und Fluktuation der Frühjahrsinstabilität (Wechsel zwischen kurzen Schichtungs- und Durchmischungsphasen) werden durch die Wetterlage bestimmt. Milde Winter und frühzeitige Eisaufbrüche bedingen in der Regel eine längere Dauer der Vollzirkulation und Frühjahrsinstabilität. Obgleich seit Ende der 1980er Jahre in Europa tendenziell wärmere Winter und damit einhergehend kürzere oder gar ausbleibende Eisbedeckungsphasen beobachtet werden, ist die Talsperre Saidenbach 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 Eisaufbruch eine zeitliche Vorverlagerung bei zunehmend stärkeren Schwankungen. Der Zeitreihenbruchpunkt („regime shift“) liegt im Jahr 1988/89 (Abbildung 2).

Epilimniontemperatur:

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 frühzeitigen Beginn der sommerlichen Stagnationsperiode zur Folge hatten.

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 Eisaufbrüche 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.

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, Abb. 1) an der Talsperren Saidenbach. Gleichzeitig gingen die Rohwasserabgabemengen, welche in der Regel aus dem (kalten) Tiefenwasserkörper erfolgen, nach 1990 deutlich zurück. Das spiegelt sich in einer geringfügigen Zunahme der Epilimnionmächtigkeit ab Mitte/am Ende der Sommerstagnationsperiode und niedrigeren Hypolimniontemperaturen wieder. Insgesamt war das mit einer deutlichen Erhöhung der Schichtungsstabilität des gesamten Wasserkörpers, insbesondere aber der oberen Wasserschichten (deutliche Reduzierung der turbulenten Durchmischung) verbunden. Daraus folgten Veränderungen unter anderem auch für die Zusammensetzung und das Wachstum der sommerlichen Phytoplanktongemeinschaft.

Zum Vergleich ist die mittlere Epilimniontemperatur der Talsperre Bautzen, im Oberlausitzer Heide- und Teichgebiet gelegen, ein zur häufigen Durchmischung neigendes Flachgewässer mit großer Oberfläche (hohe Windexposition), für den gleichen Zeitraum dargestellt (Abbildung 1). Die zeitliche Änderung ihrer mittleren Epilimniontemperatur steht mit 0,8 K/Dekade in Analogie zur am Beispiel der Talsperre Saidenbach festgestellten Änderung.

Der Klimawandel äußert sich in global steigenden Lufttemperaturen. Damit einhergehend kommt es in Seen und Talsperren auch 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.

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 zur Zunahme des Phytoplanktonbiomasse, dem Aufkommen/der Dominanz unerwünschter Cyanobakterien und/oder, zu längeren Perioden mit Sauerstoffmangel im Meta- und/oder Hypolimnion. Letzterer forciert darüber hinaus die unerwünschte Freisetzung und Anreicherung reduktiver Substanzen aus dem Sediment, beispielsweise Mangan und Ammonium, die neben den vorab aufgeführten Eutrophierungseffekten im Falle von Trinkwassertalsperren vor allem Mehraufwendungen im Wasseraufbereitungsprozess bedeuten können.

Die Temperatur ist einer der wichtigsten Faktoren für die Struktur und Funktion von Ökosystemen. Sie beeinflusst die Geschwindigkeit und die Gleichgewichtslage chemischer Reaktionen, die Geschwindigkeit von Stoffwechselprozessen und die Löslichkeit von Gasen. Sie hat damit einen weitreichenden Einfluss auf eine Vielzahl von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen/Eigenschaften.

Abbildungen

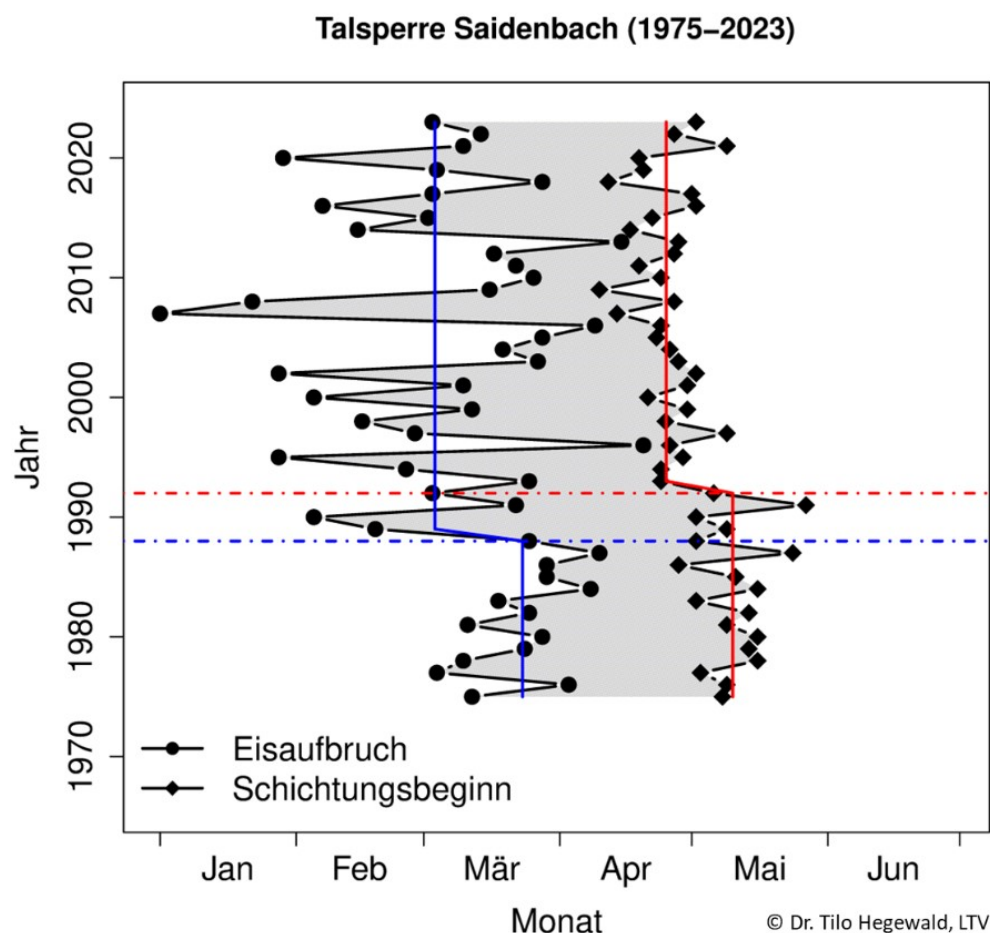


Abbildung 2: Eisaufbruch und Beginn der sommerlichen Stagnationsphase in der TSS im Zeitraum von 1975 bis 2023 sowie die für die Zeitreihen statistisch ermittelten Strukturbrüche (gestrichelte farbige Linien) und aus den Strukturbruchmodellen abgeleitete mittlere zeitliche Verläufe (farbige Linien) für Eisaufbruch und Schichtungsbeginn.

Klimafolgenmonitoring

Entwicklung Die festgestellten Trends mit einer dekadischen Erhöhung der Epilimniontemperaturen um $0,75^{\circ}\text{K}$ und $0,8^{\circ}\text{K}$ an den Talsperren Saidenbach und Bautzen sind signifikant (Kendalls Tau = 0,59 für die Talsperre Saidenbach, $p < 0,01$ bzw. Kendalls Tau = 0,65 und $p < 0,01$ für die Talsperre Bautzen). Setzt sich dieser Trend weiter so fort, sind weitere Änderungen hinsichtlich Schichtungsdynamik und einhergehender indirekter Folgen zu erwarten, die sich wiederum auf die Wasserbereitstellung auswirken können.

Literaturverzeichnis

1. FELDBAUER, J., LADWIG, R., MEMAN, J.P., MOORE, T.N., ZÜNDORF, H., BERENDONK, T. & 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 – WASSERBESCHAFFENHEITSENTWICKLUNG 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., ET AL. (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.
8. BAI, J. & P. PERRON (2003): COMPUTATION AND ANALYSIS OF MULTIPLE STRUCTURAL CHANGE MODELS. JOURNAL OF APPLIED ECONOMETRICS 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. JOURNAL OF STATISTICAL SOFTWARE 7: 1-38
10. HIRSCH, R.M., SLACK, J.R. & R.A. SMITH (1982): TECHNIQUES OF TREND ANALYSIS FOR MONTHLY WATER QUALITY DATA. WATER RESOURCES RESEARCH, V. 18, NO. 1, P. 107–121

Glossar Synoptik, synoptische Meteorologie, 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)

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 (Frühjahrszirkulation) die gesamte Wassermasse durchmischt wird. (Spektrum online - Biologielexikon; siehe auch Monomiktisch und Polymiktisch)

Autor: Dr. Tilo Hegewald; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Landestalsperrenverwaltung
Abteilung 2; Referat 24; Telefon: 03501-796 XXX; E-Mail: Referat24@ltv.sachsen.de, FachzentrumKlima@lfulg.sachsen.de;
Redaktionsschluss: 30.01.2025; www.lfulg.sachsen.de