



# Gewässer im Klimawandel: Welche Herausforderungen erwarten uns?

Michael Hupfer

Dresden, 5. Dezember 2024



21. Sächsische Gewässertage  
Herausforderungen, Bausteine und gute Lösungen für die  
Bewirtschaftung der Gewässer im Klimawandel



STAATSMINISTERIUM  
FÜR ENERGIE, KLIMASCHUTZ,  
UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT



## Klimawandel in Deutschland

### Auswirkungen von Klimafaktoren auf Gewässer

Direkte und in indirekte Wirkungen

Ökologische „Katastrophen“

Schichtungsverhalten in Standgewässern

### Anpassungen

Monitoring und Vorhersagemodelle

Handlungsoptionen

# Hitzesommer 2018 und 2022: Vorgeschmack auf die zukünftige Normalität?



# Klimawandel: Deutschland



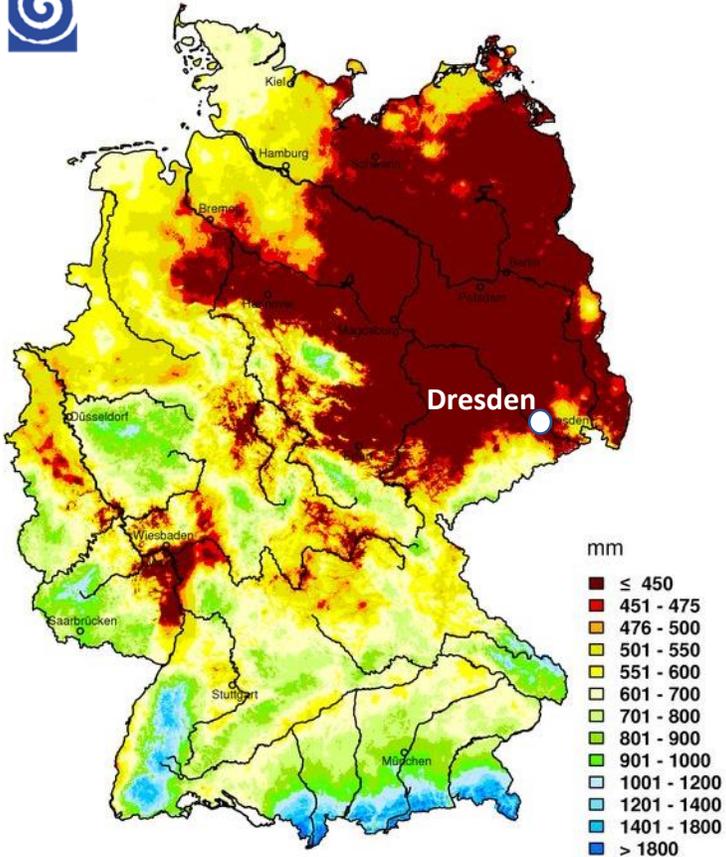
2018

2019

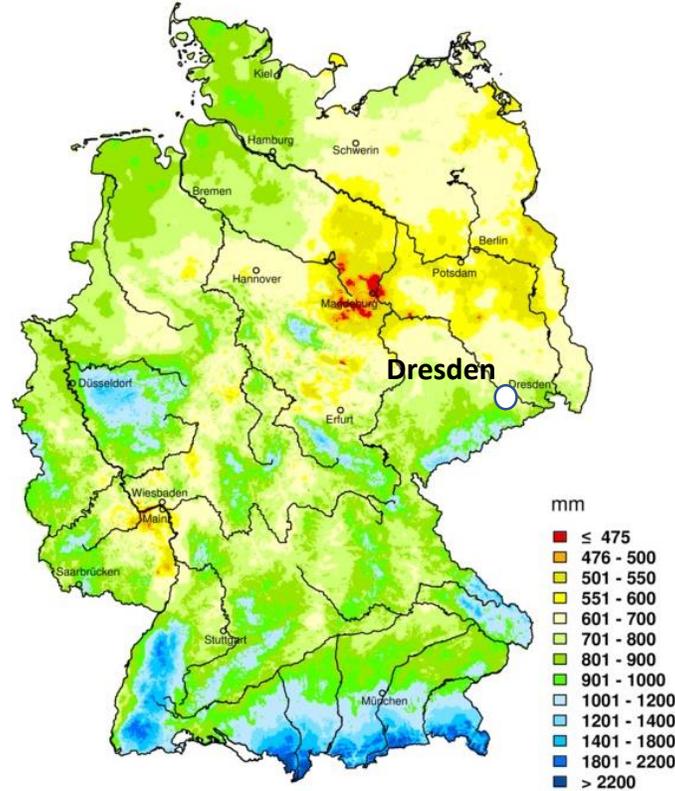
2020

2021

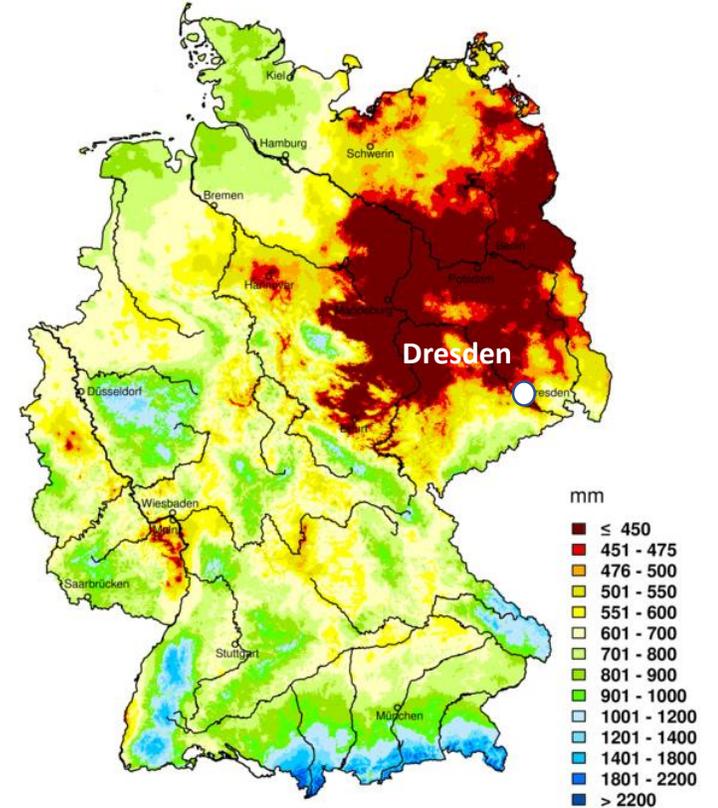
2022



Brandenburg **390 mm**  
Sachsen 468 mm



Brandenburg 600 mm  
Sachsen 778 mm



Brandenburg **434 mm**  
Sachsen 565 mm

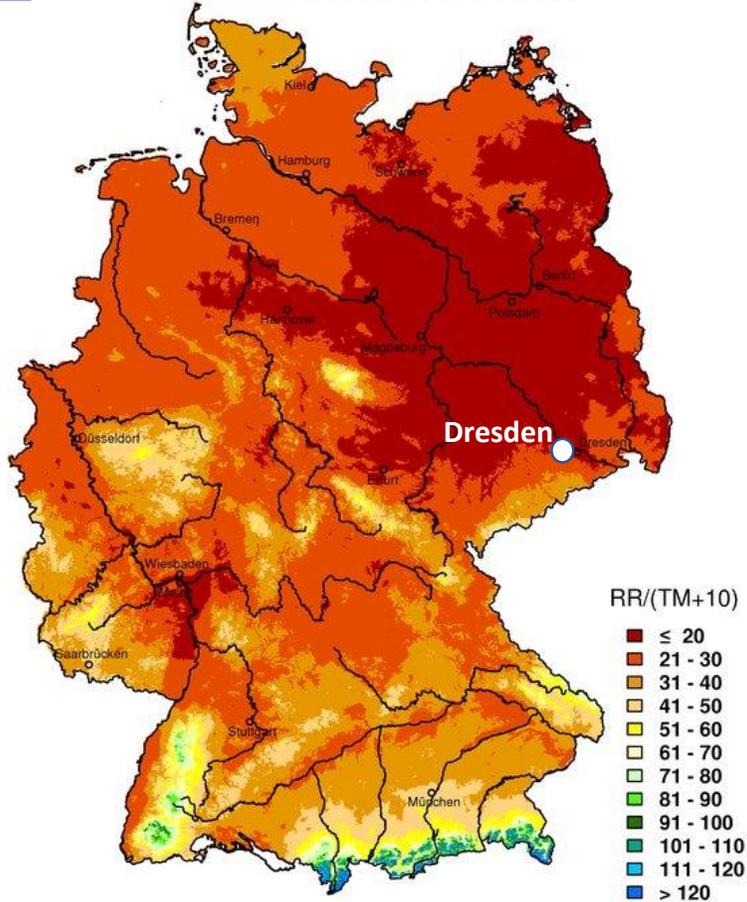
**Semiaride Regionen:** 250 bis 500 mm (IPCC)



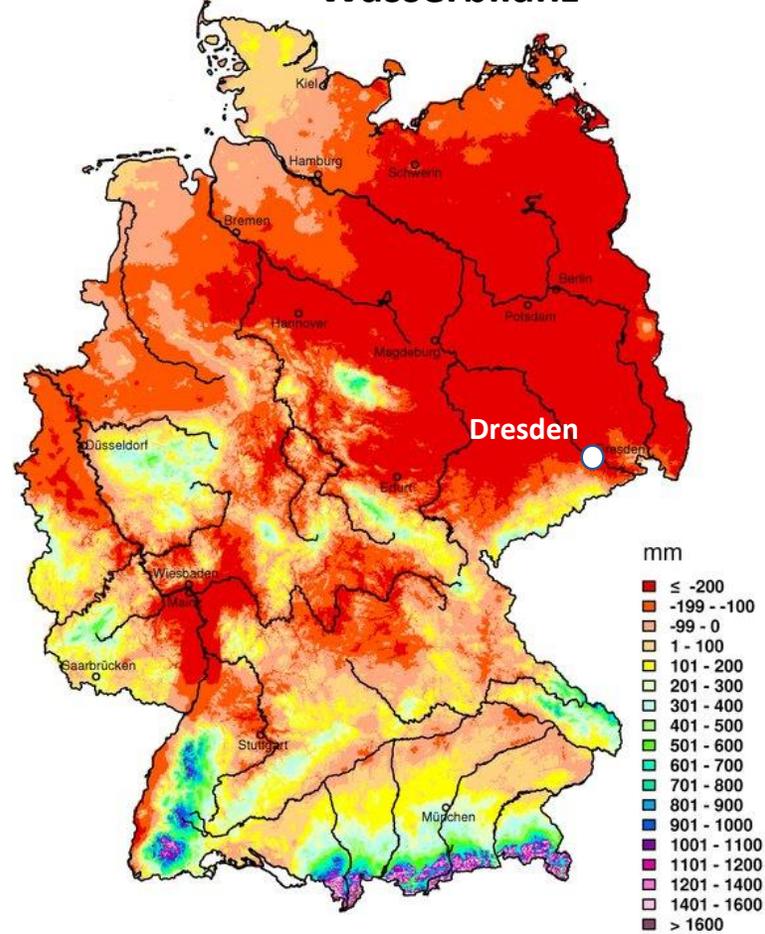
# Klimawandel: Deutschland



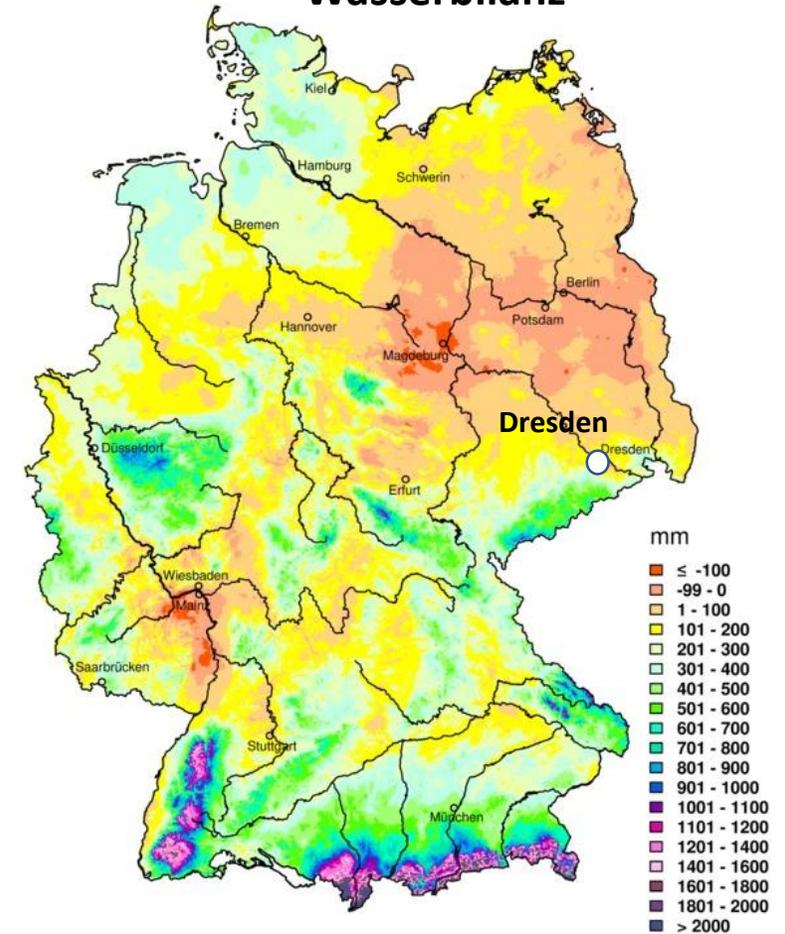
2018  
Trockenheitsindex



2018  
Wasserbilanz



2021  
Wasserbilanz



Wasserbilanz ist in Sachsen und Brandenburg ist überwiegend negativ:  
Bilanz aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung bezogen auf ein Gebiet und einen Zeitraum.

# Klimawandel: Deutschland

Häufung von Trockenjahren (2018, 2019, 2020, 2022) und Jahren mit negativer Wasserbilanz

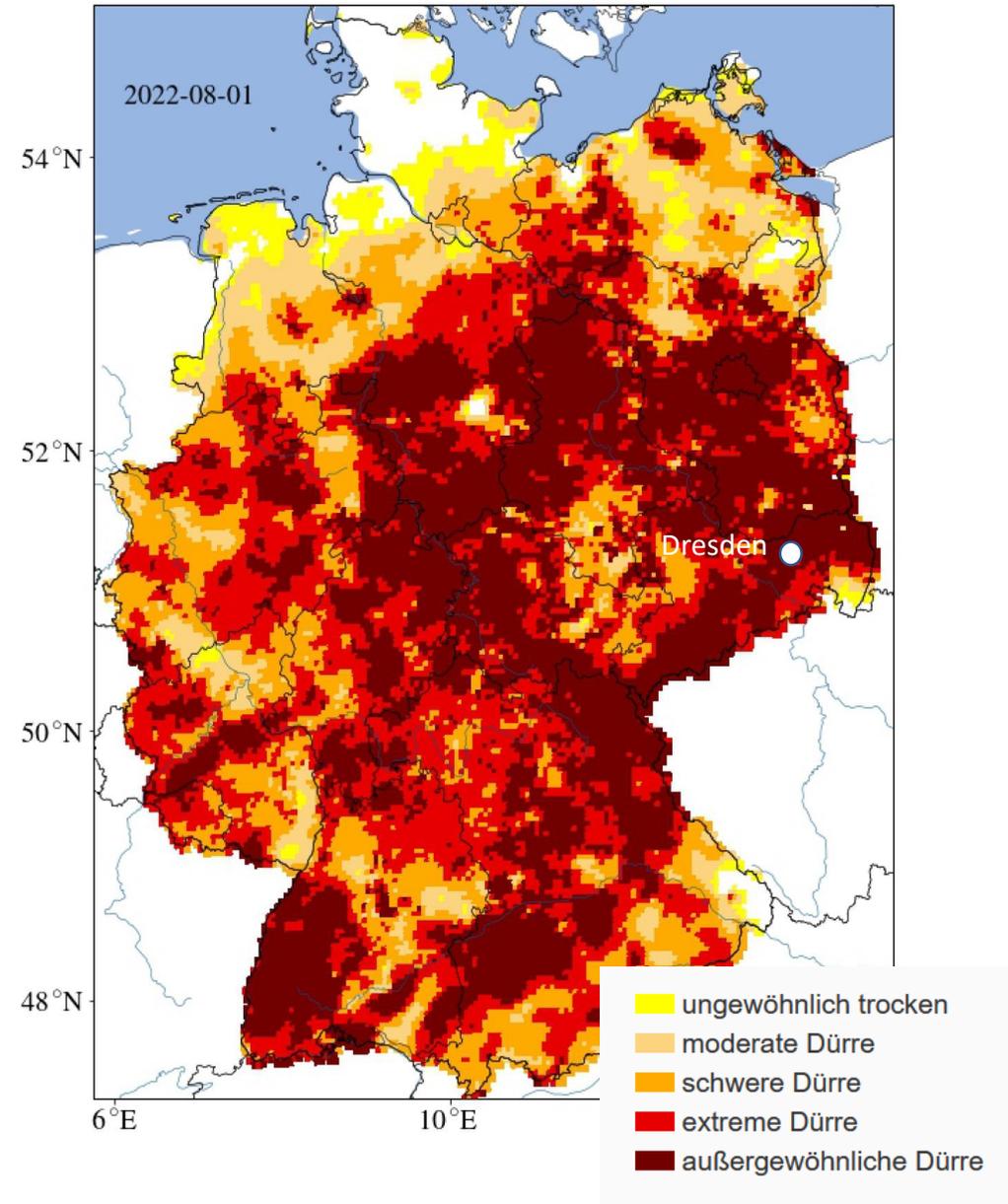
In Folge der Hitze und Trockenheit kam es zu **Waldbränden**, **Ernteaussfällen**, **Waldsterben** und anderen **Hitzeschäden**.

Es gibt große regionale Unterschiede in Deutschland

Dürremonitor Deutschland (UFZ)

<https://www.ufz.de/index.php?de=37937>

**Semiaride Regionen:** 250 bis 500 mm (IPCC)



# Klimawandel: Deutschland

Häufung von Trockenjahren (2018, 2019, 2020, 2022) und Jahren mit negativer Wasserbilanz

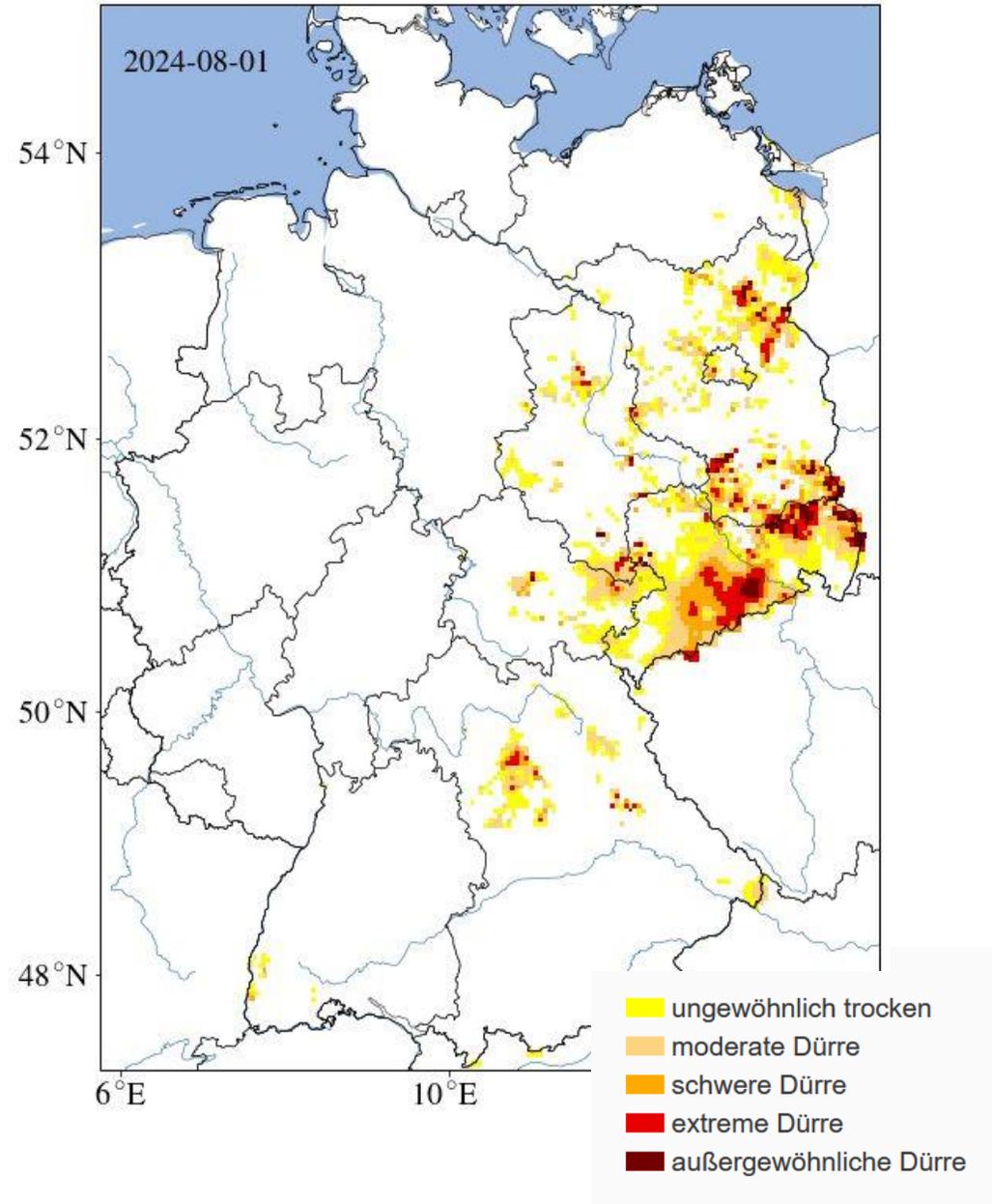
In Folge der Hitze und Trockenheit kam es zu **Waldbränden, Ernteaussfällen, Waldsterben** und anderen **Hitzeschäden**.

Es gibt große regionale Unterschiede in Deutschland

Dürremonitor Deutschland (UFZ)

<https://www.ufz.de/index.php?de=37937>

**Semiaride Regionen:** 250 bis 500 mm (IPCC)



# Klimawandel: Deutschland

Der lineare Trend der Temperaturentwicklung seit 1881 ist in Deutschland mit **1,7°C** höher als der weltweite Anstieg mit **1,1 °C**.

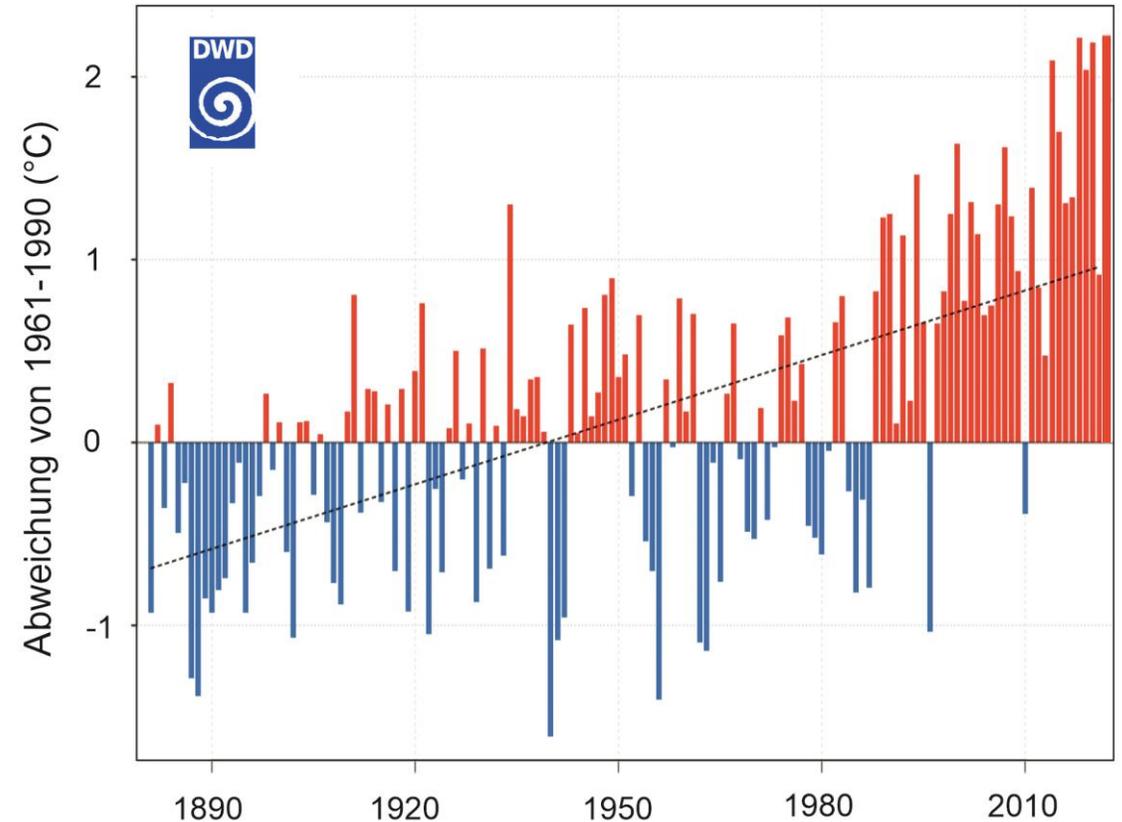
Seit 1981 steigt die Lufttemperatur mit **0,39°C** pro Dekade. Weltweit: **0,18° C** pro Dekade

Während der letzten 36 Jahre traten nur zwei unterdurchschnittlich warme Jahre auf.

Die sechs wärmsten Jahre wurden innerhalb der letzten 8 Jahre registriert. „Rekorde“ sind **2018 und 2022: 10,5°C**

Wärmstes Bundesland: **Berlin**

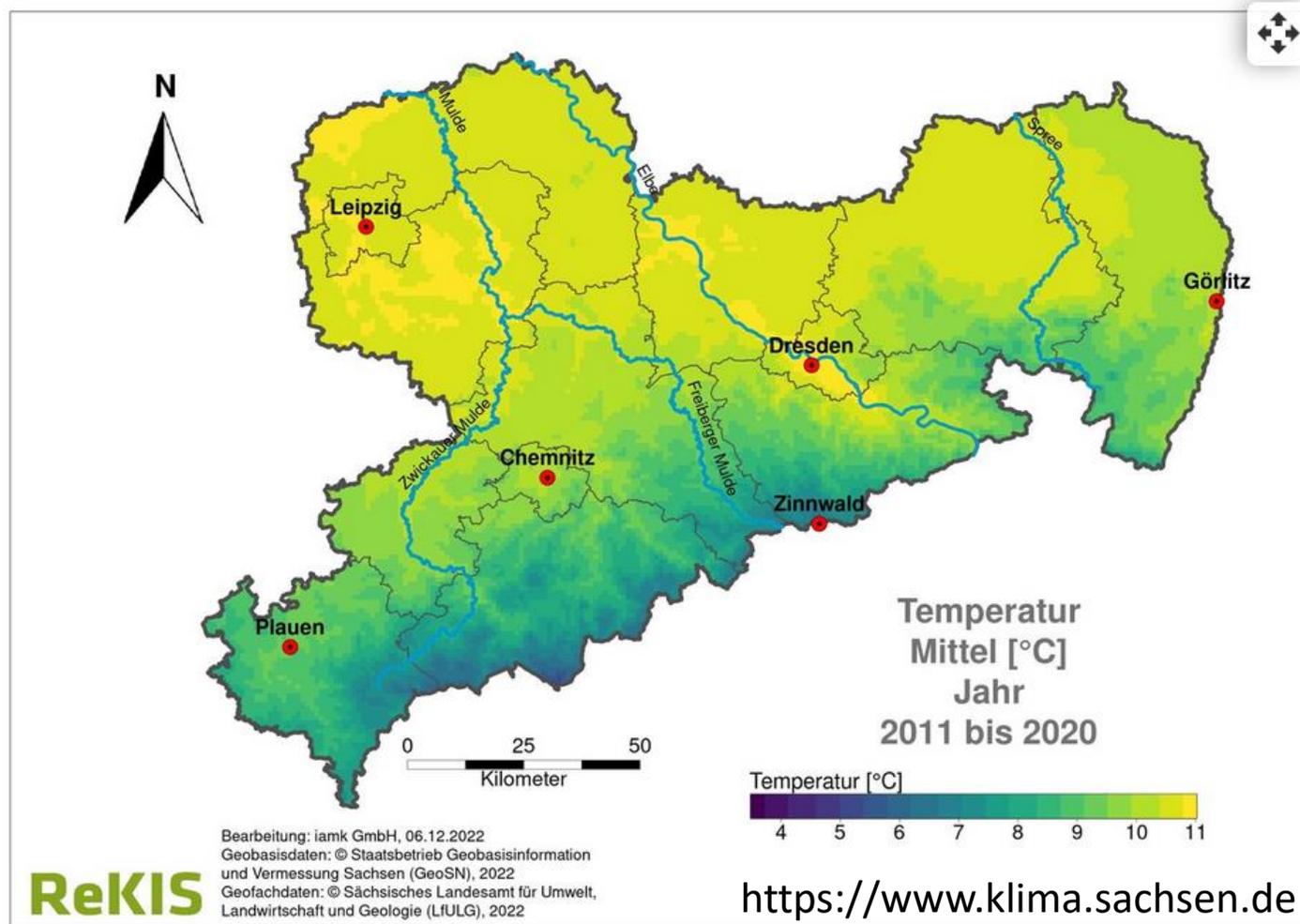
**Die aktuelle Erderwärmung verläuft mehr als 100 mal schneller als die nach der letzten Eiszeit.**



*Temperaturanomalie in Deutschland in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 (8,2°C)*



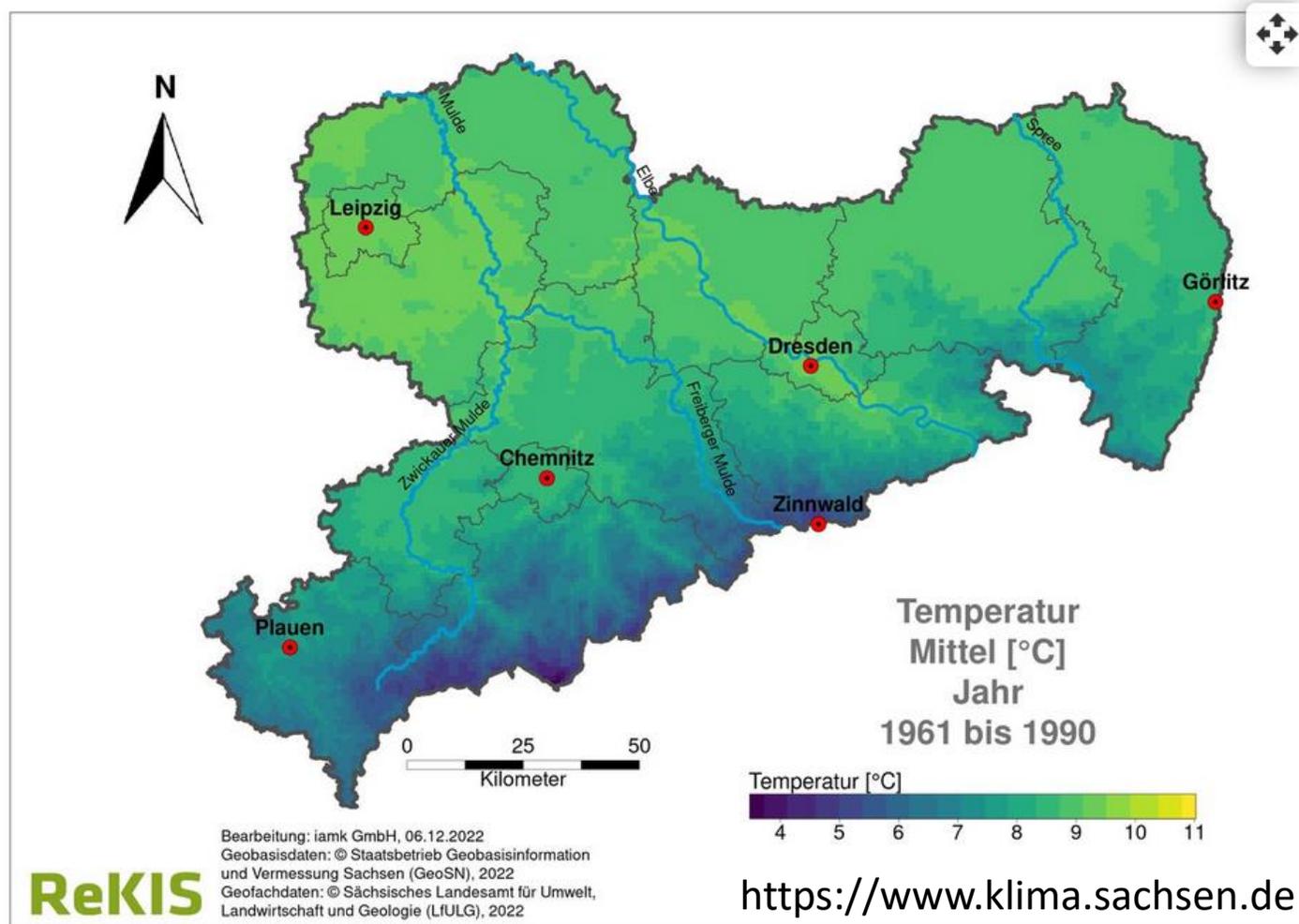
# Klimawandel: Sachsen



Im Vergleich zur Referenzperiode stieg die Temperatur im 1,6 °C, die Zahl der Sommertage (>25°C) erhöhte sich um 19 Tage und die Anzahl der Frosttage (< 0°C) verringerte sich um 15 Tage.



# Klimawandel: Sachsen



Im Vergleich zur Referenzperiode stieg die Temperatur im 1,6 °C, die Zahl der Sommertage (>25°C) erhöhte sich um 19 Tage und die Anzahl der Frosttage (< 0°C) verringerte sich um 15 Tage.



# Klimawandel und Gewässer



Gewässer sind tiefste Punkte in der Landschaft und sind daher sensible Indikatoren für Veränderungen. Sie reagieren sehr unterschiedlich auf veränderte Klimafaktoren

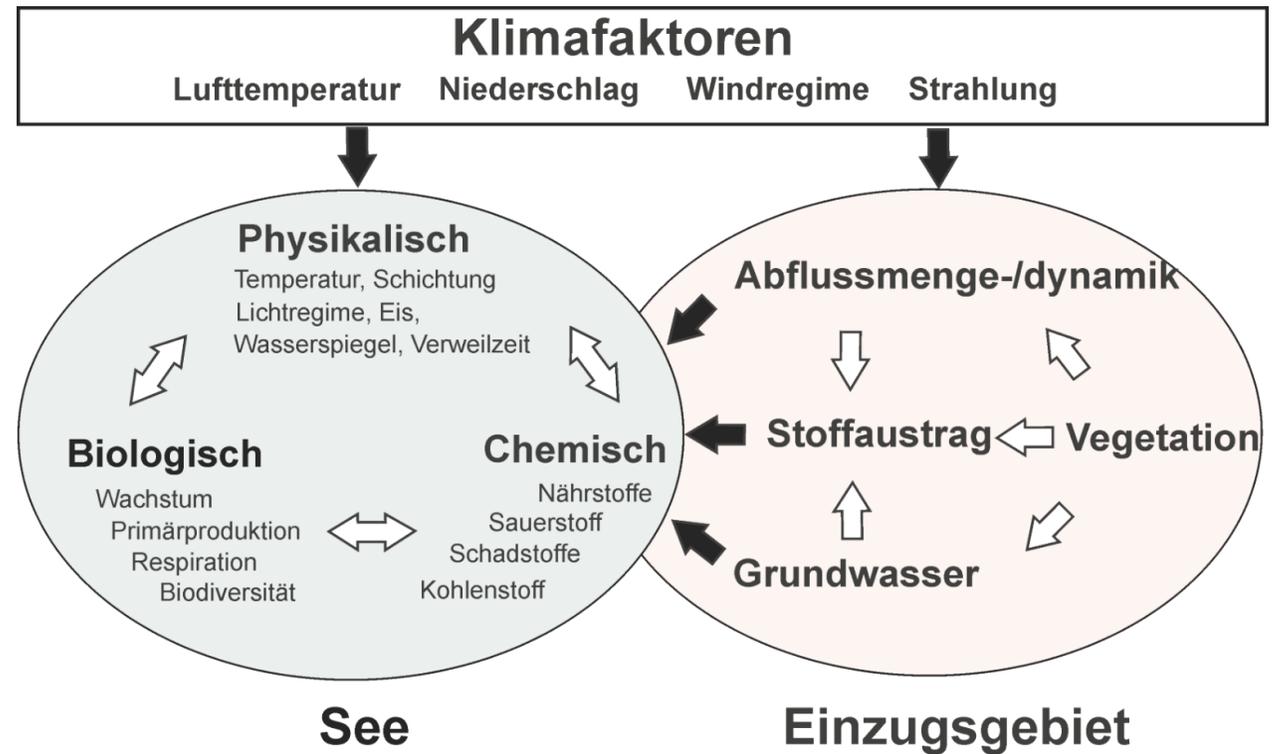


# Klimawandel und Gewässer

Klimafaktoren wirken **direkt** auf die Gewässer und verändern ihre physikalische Struktur (Wassertemperatur, Mischungsregime, Abfluss, Eisbedeckung, Pegel)

**Physikalische Treiber** führen zu ökologischen Reaktionen und verändern das Seeökosystem und ihre Funktionen.

Klimafaktoren wirken **indirekt** über das Einzugsgebiet auf Gewässer und verändern die Wasserzufuhr und den Stoffeintrag.



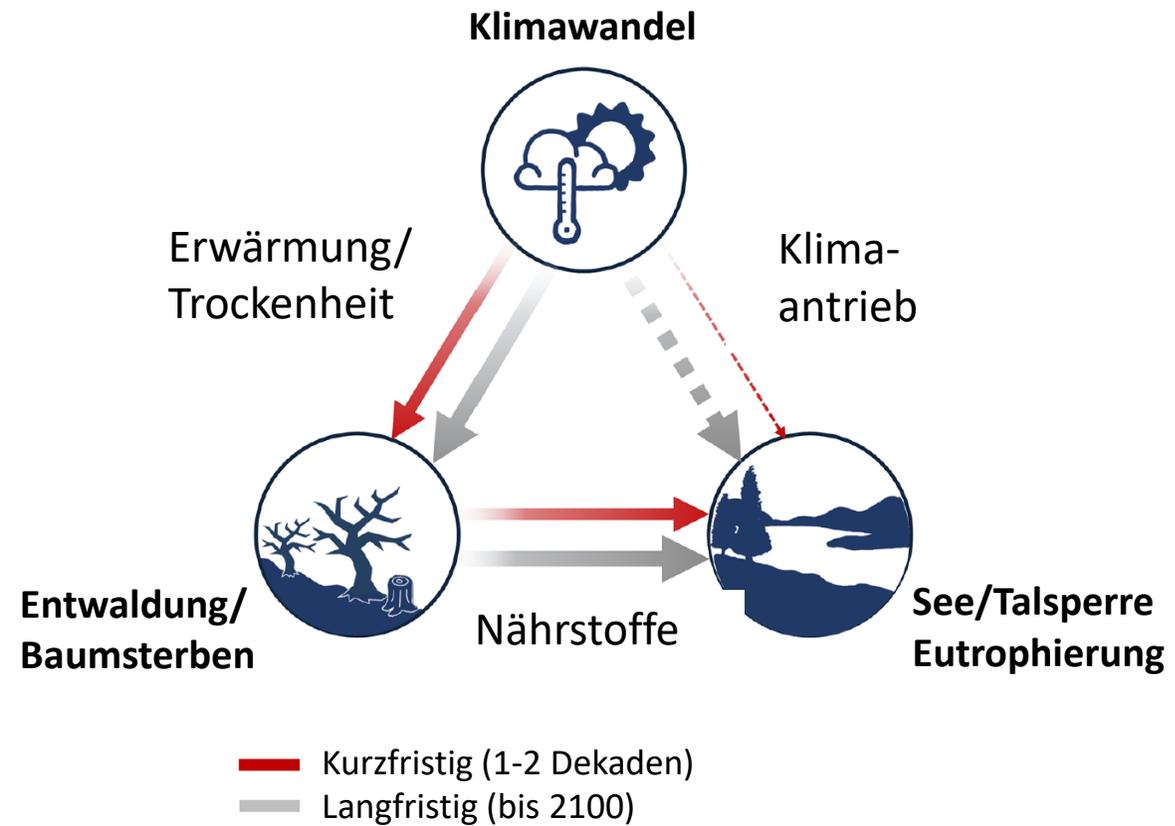
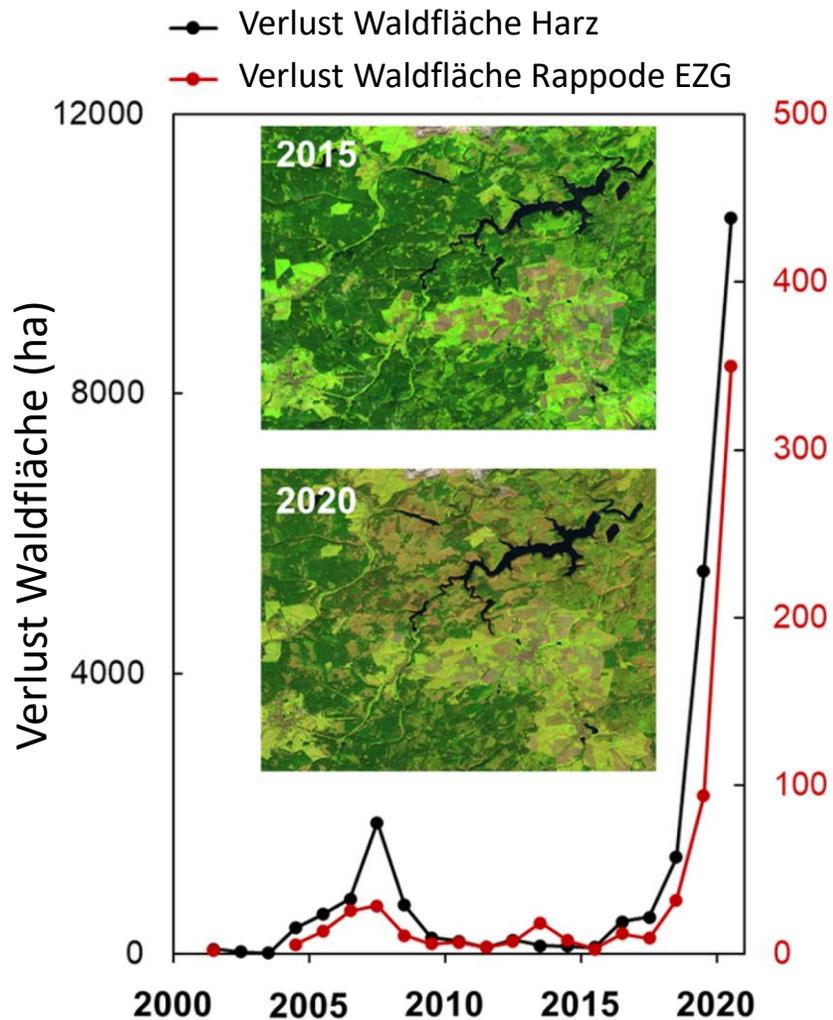
*Hupfer & Nixdorf (2011)*

Nicht alle (negativen) Veränderungen lassen sich auf den Klimawandel zurückführen (nur **26% der Seen in Deutschland** erreichen den guten ökologischen Zustand).

**Klimaeffekte von anderen Veränderungen und Belastungen schwer zu trennen**



# Indirekte Wirkung von Klimatelementen auf Gewässer



Kong et al. (2022) Wat. Res. 221

**Waldsterben im Harz:** Modellbasierte Berechnungen zeigen, dass **indirekte Effekte** (Entwaldung) die Trophie kurzfristig von **mesotroph** auf **eutroph** verändern. **Direkte Effekte** wirken sich erst später zusätzlich aus.

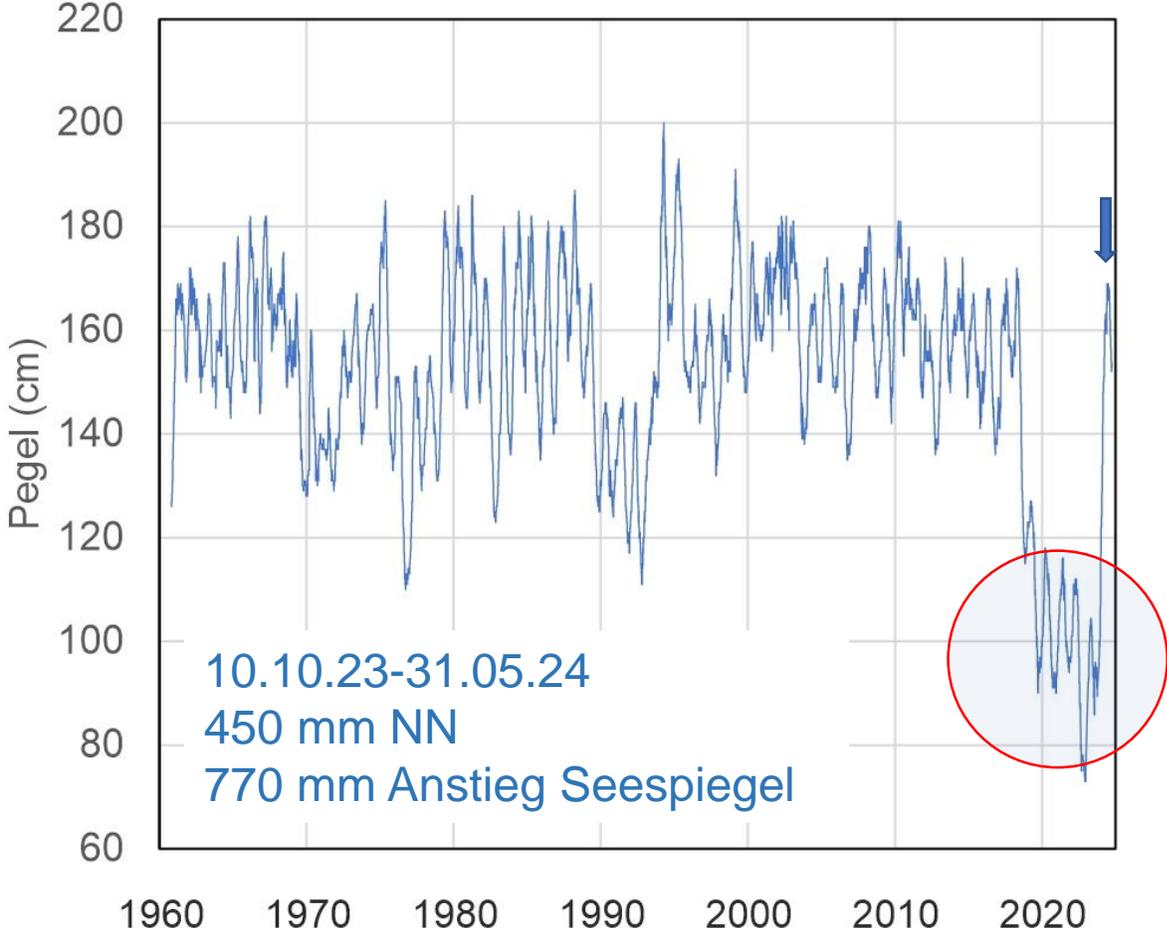
# Indirekte Wirkung von Klimaelementen auf Gewässer



Sinkende und wechselnde Wasserstände von Seen sind meist multifaktoriell



# Indirekte Wirkung von Klimaelementen auf Gewässer



Sinkende und wechselnde Wasserstände von Seen sind meist multifaktoriell



# Belastungen und Hitzewellen: Fischsterben in der Oder August 2022

## Was ist passiert?

Massives Fischsterben:

> 200 Tonnen Fisch wurden eingesammelt und entsorgt

Schätzung: 1.000 Tonnen Fischverlust

Massive Störung der benthischen Fauna vor allem filtrierende Tiere (Muscheln, Schnecken, Insektenlarven)

Vögel und Säugetiere waren nicht betroffen

## Was wurde noch beobachtet?

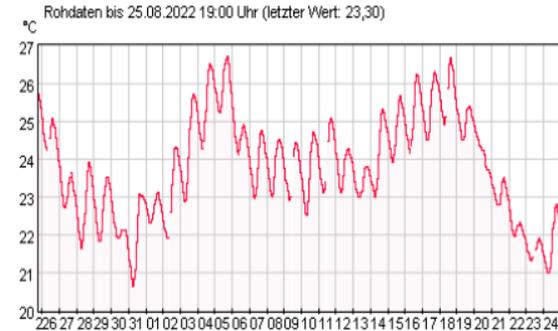
Starke Erwärmung des Wasserkörpers

Hohe Leitfähigkeit (> 2 mS)

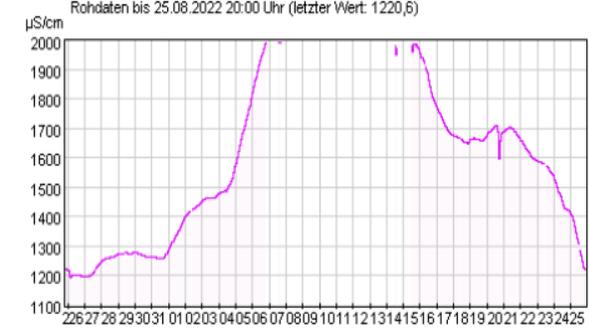
Hohe Sauerstoffkonzentrationen und pH Werte

Starke Trübung (Chla > 300 µg/L)

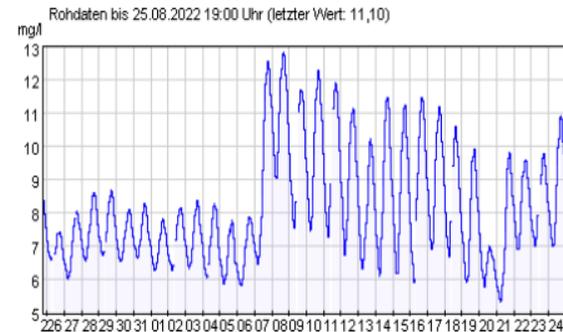
aktuelle Wassertemperatur



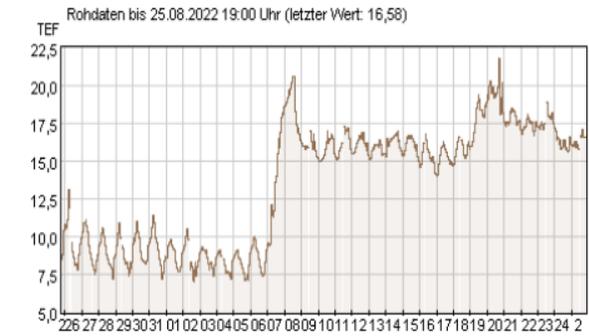
aktuelle elektrische Leitfähigkeit



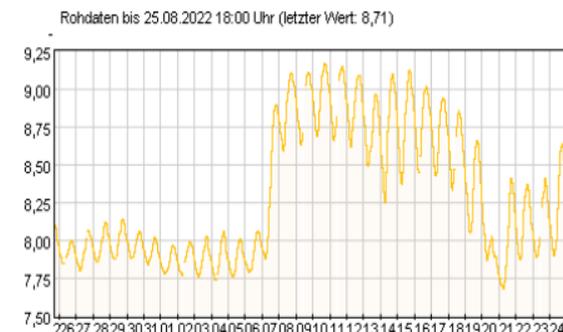
aktueller Sauerstoffgehalt



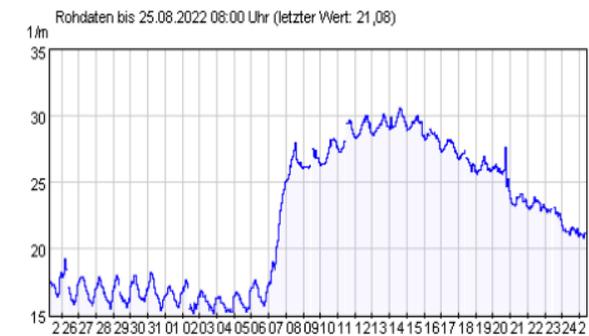
aktuelle Trübung



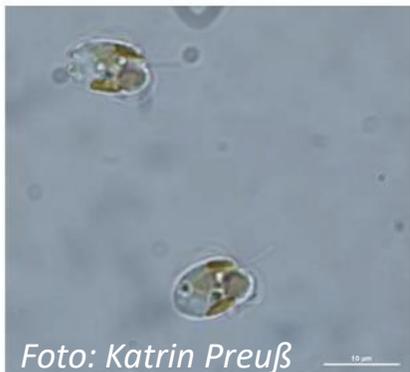
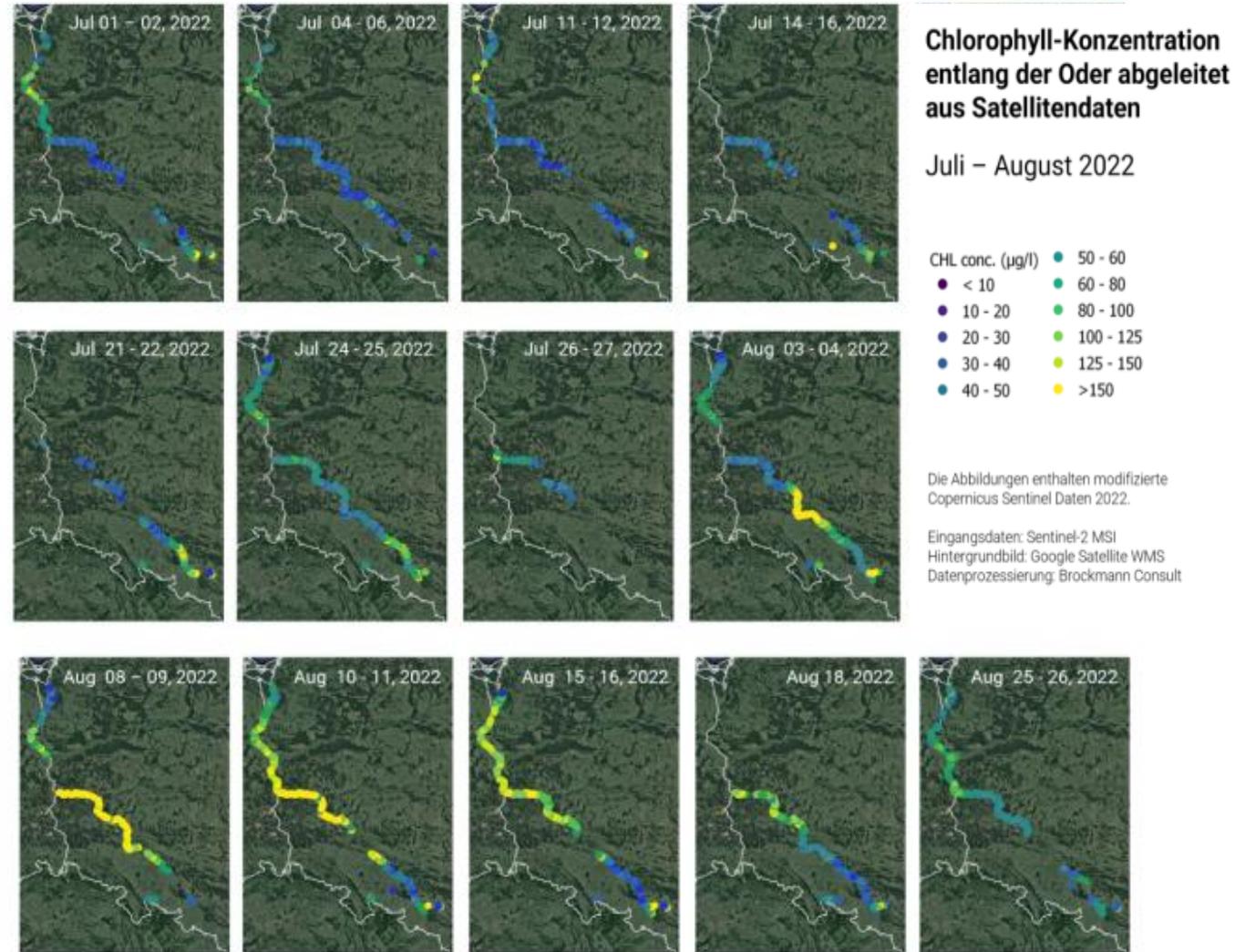
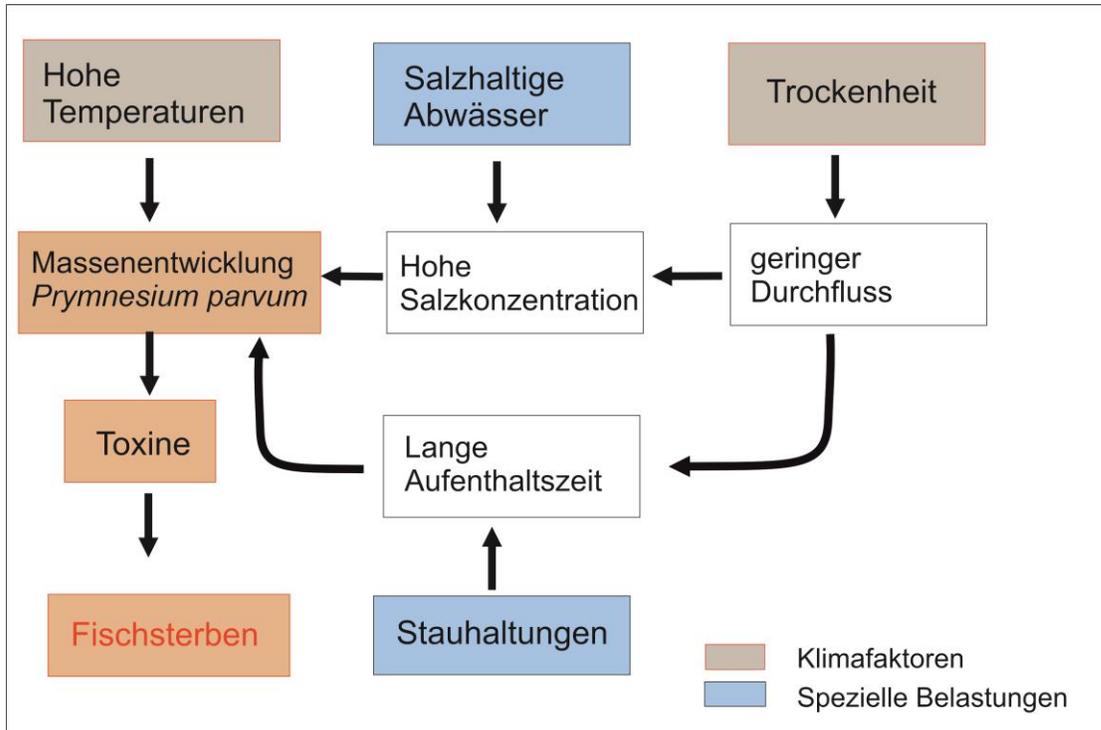
aktueller pH-Wert



aktuelle UV-Absorption bei 254 nm

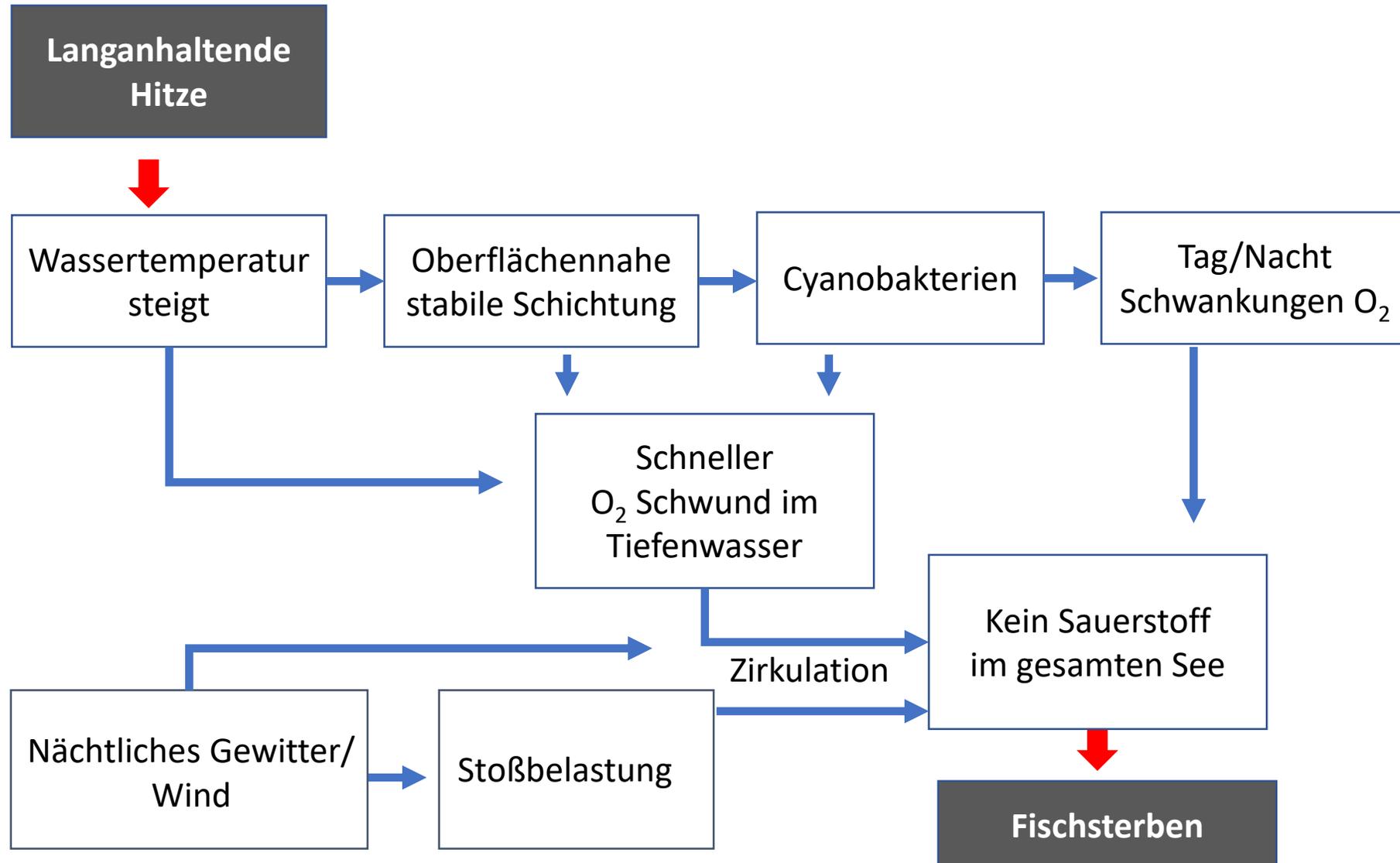


# Belastungen und Hitzewellen: Massives Fischsterben in der Oder August 2022

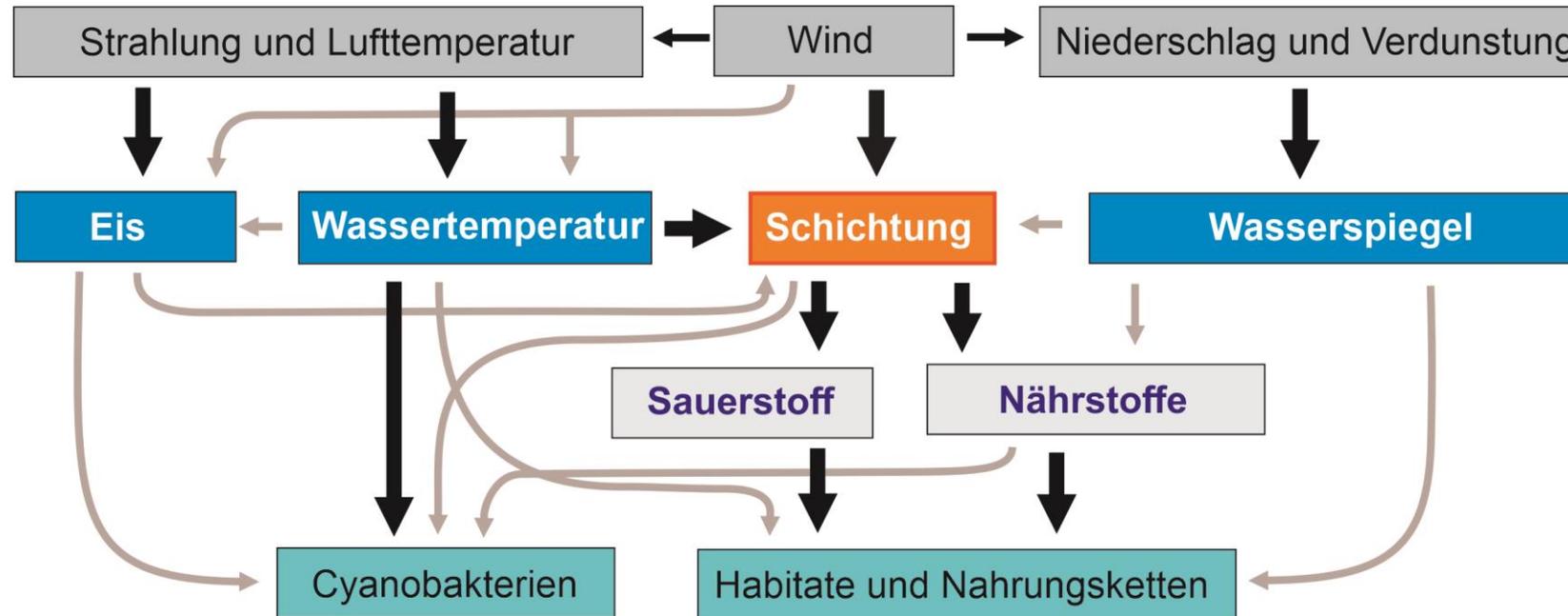


***Prymnesium parvum***  
 Oder in der Nähe von Hohenwutzen  
 15. August 2022

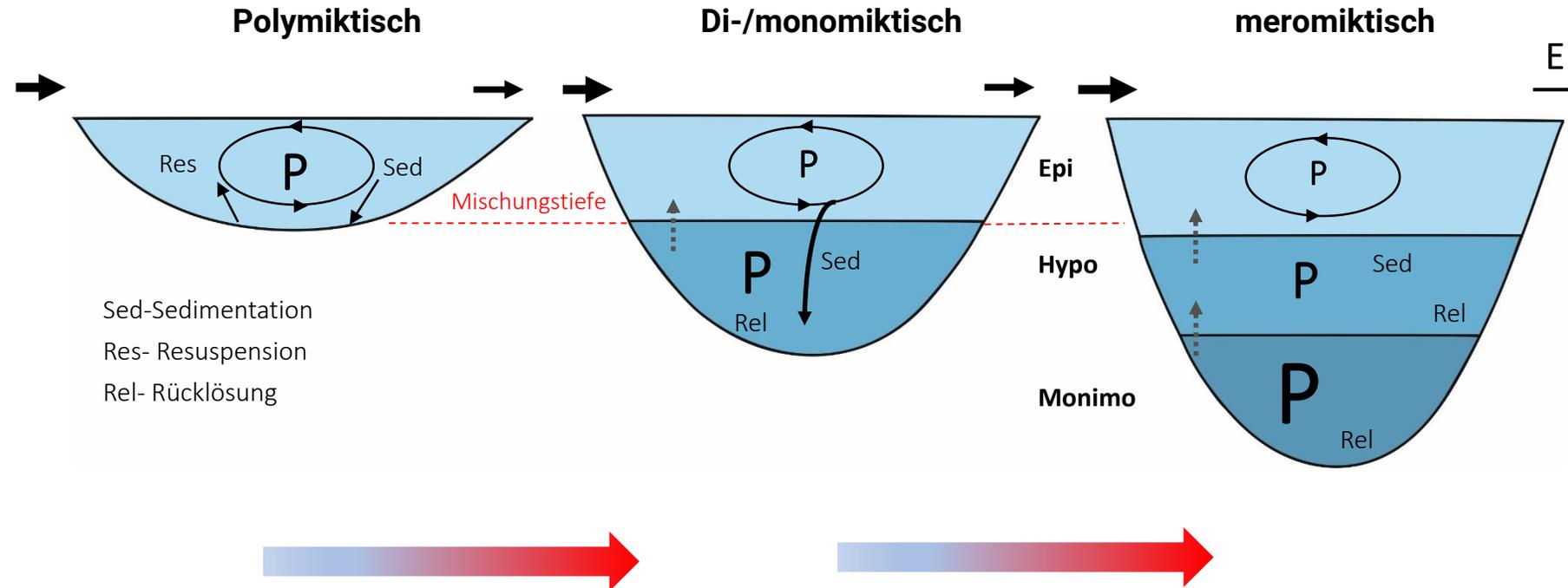
# Hitzewellen: Fischsterben in Flachseen



# Direkte Wirkung von Klimaelementen auf stehende Gewässer



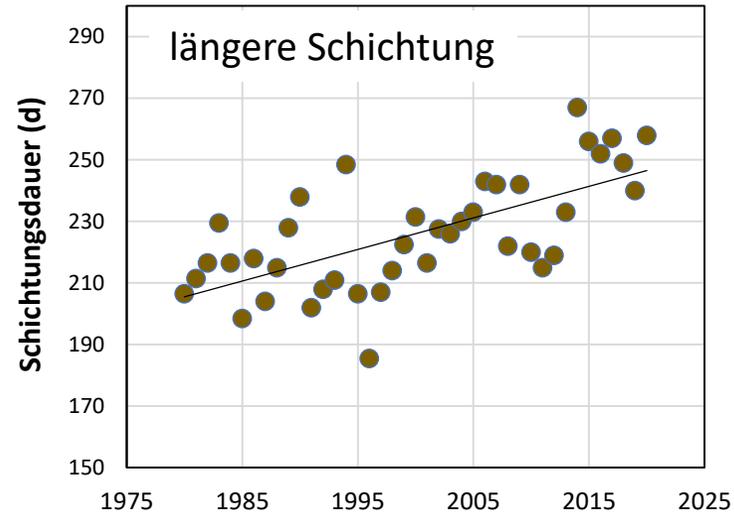
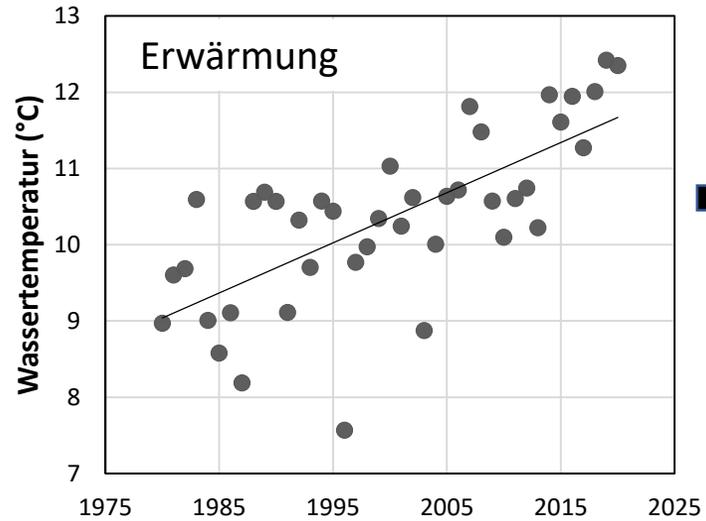
# Schichtung in Seen und Phosphorverfügbarkeit



Längere Schichtung und Änderung des Mischungsregimes verändert die Verteilung und Verfügbarkeit von Phosphor.

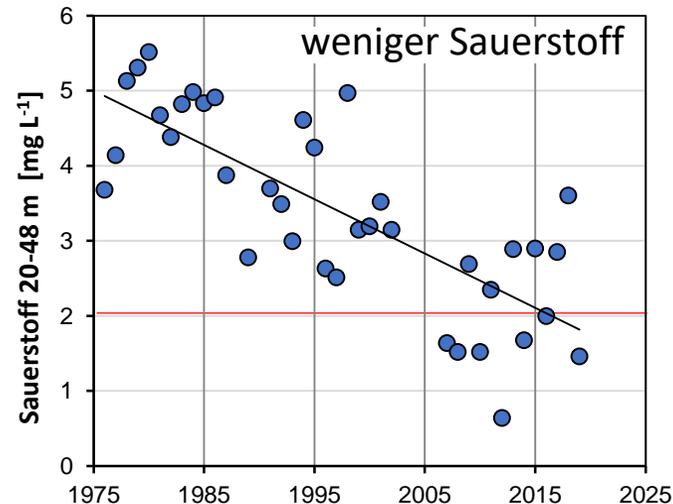
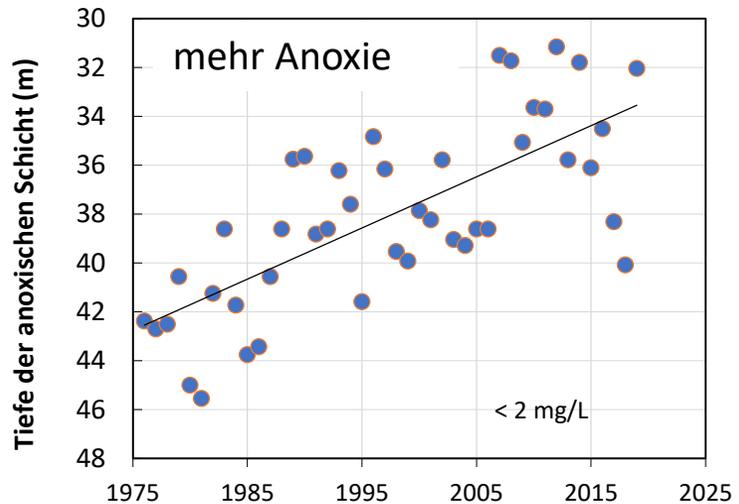


# Auswirkungen des Klimawandels auf Seen



Temperatur/Schichtung

## Fallbeispiel Arendsee

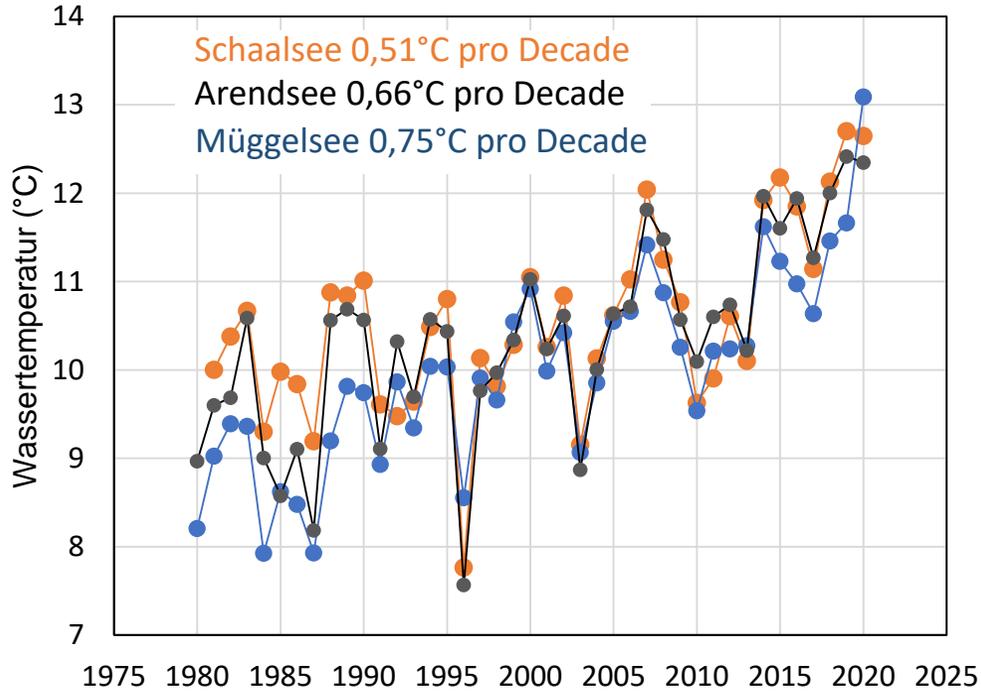


Sauerstoff im Tiefenwasser



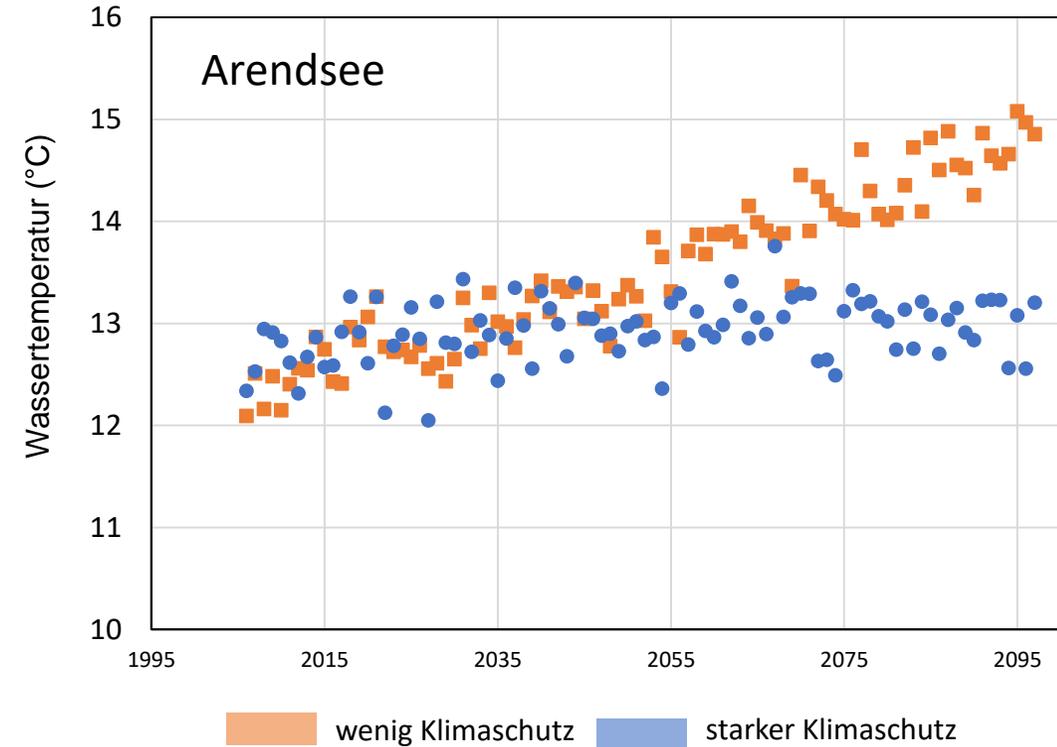
# Auswirkungen des Klimawandels auf Seen

## Rückblick



Zunehmende Erwärmungstrends mit  $>0,5^{\circ}\text{C}$  pro Dekade (seit 1980) und synchrone interannuelle Schwankungen

## Blick in die Zukunft

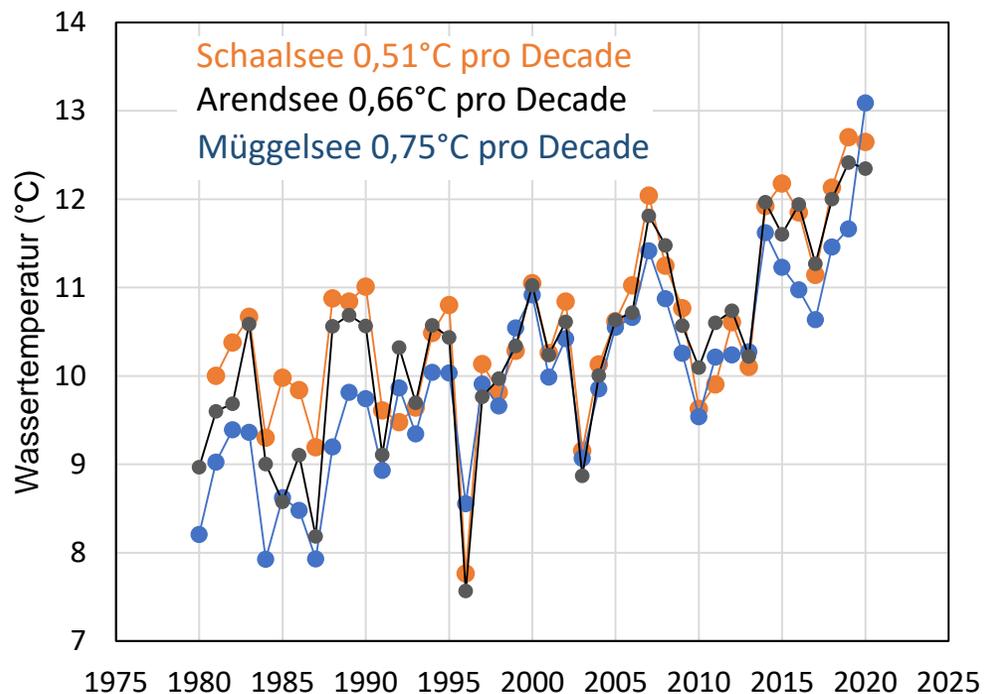


Im Szenario mit wenig Klimaschutz steigt die Temperatur um weitere  $2,2^{\circ}\text{C}$ . Die Schichtung verlängert sich um nochmals 28 Tage



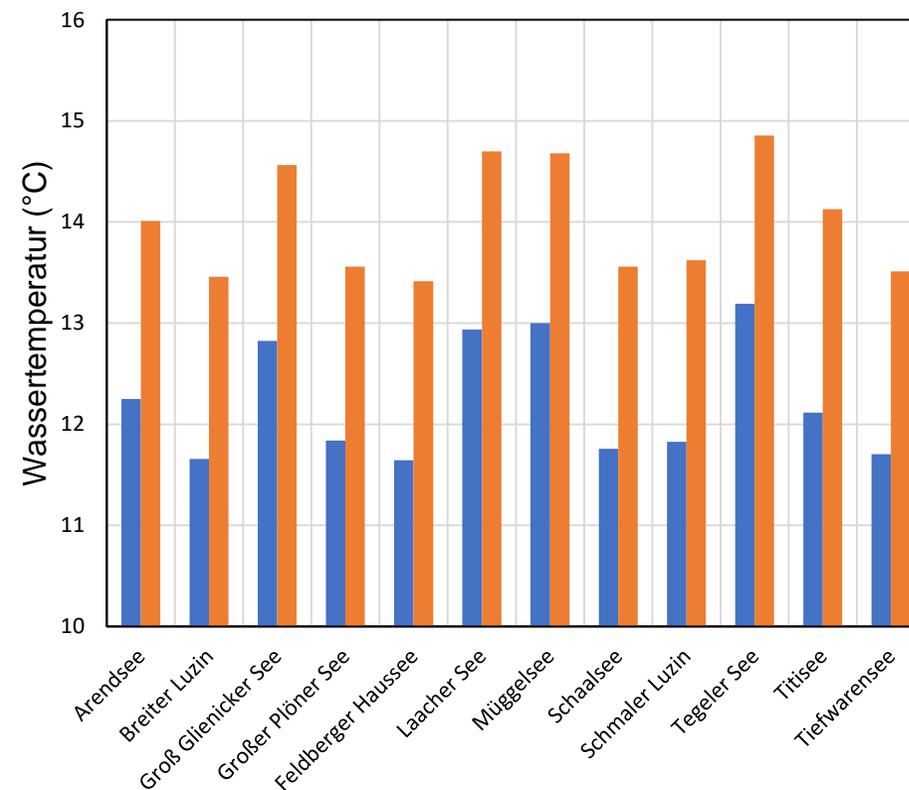
# Auswirkungen des Klimawandels auf Seen

## Rückblick



Zunehmende Erwärmungstrends mit  $>0,5^{\circ}\text{C}$  pro Dekade (seit 1980) und synchrone interannuelle Schwankungen

## Blick in die Zukunft



Schichtungsdauer

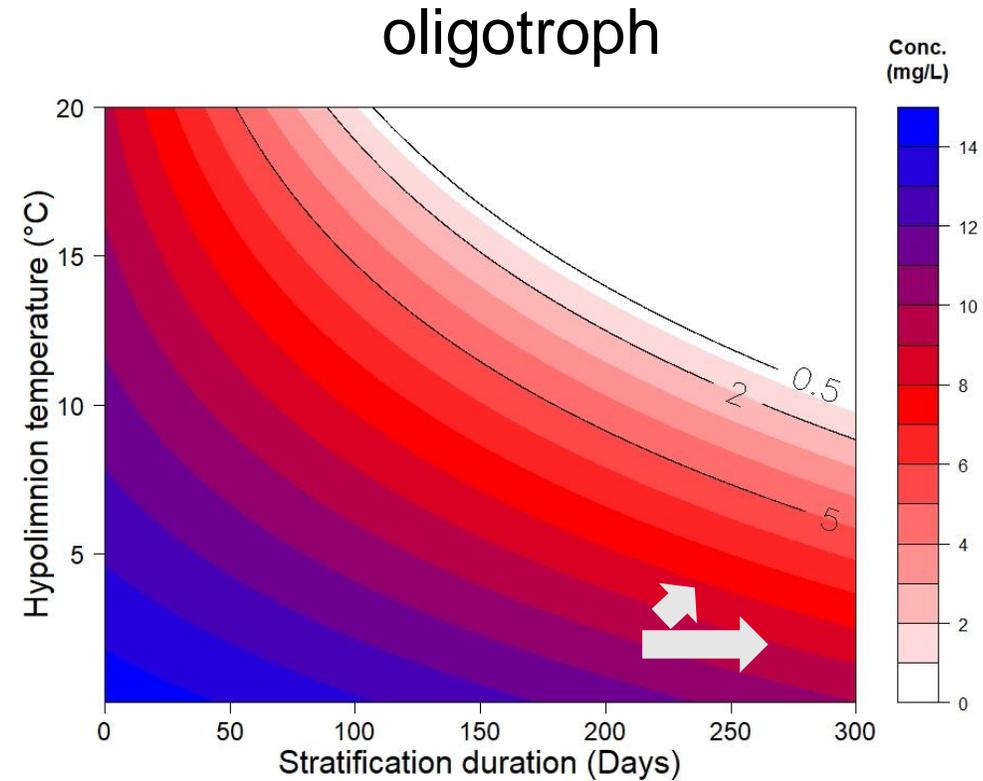
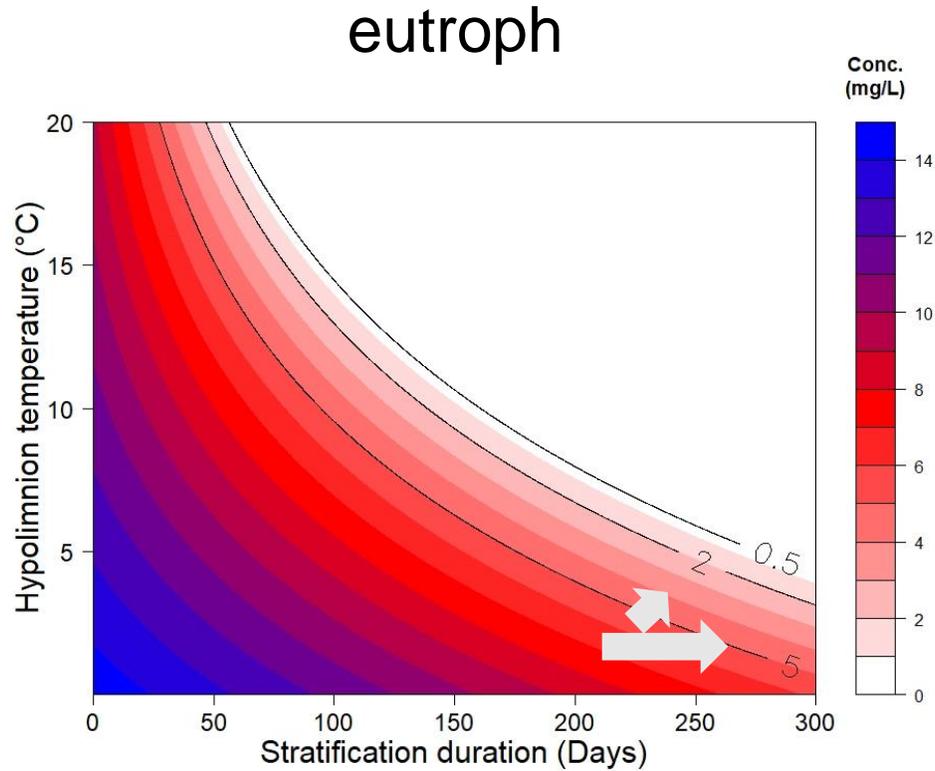
255 (RCP 8.5) Tage >> 237 Tage (RCP 2.6)

Oberflächentemperatur  $>25^{\circ}\text{C}$

30,6 Tage (RCP 8.5) >> 11,0 Tage (RCP 2.6)



# Modellierbare Auswirkungen des Klimawandels



*Modell von Nkwalale et al. (2023)*

Mittlerer Sauerstoffgehalt im Hypolimnion als Funktion der Tiefenwassertemperatur und Schichtungsdauer

**Eutrophierte Seen sind durch Klimaerwärmung stärker gefährdet.**



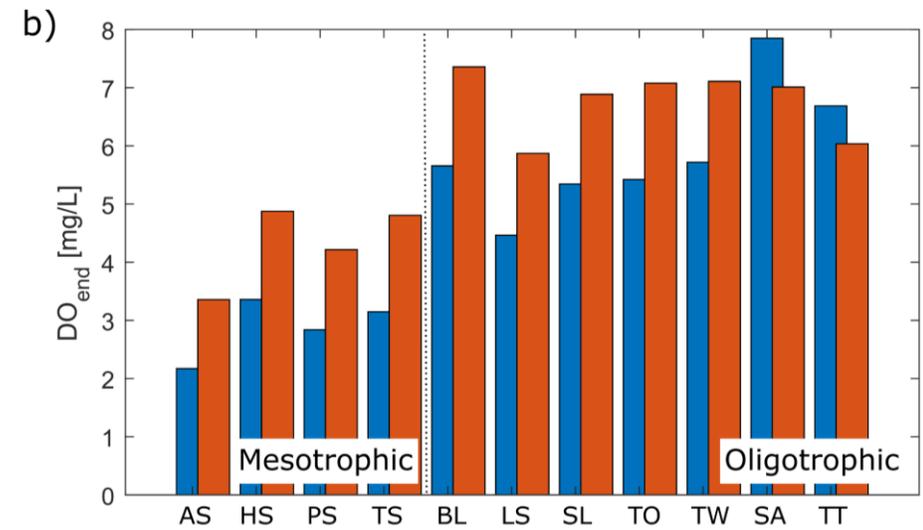
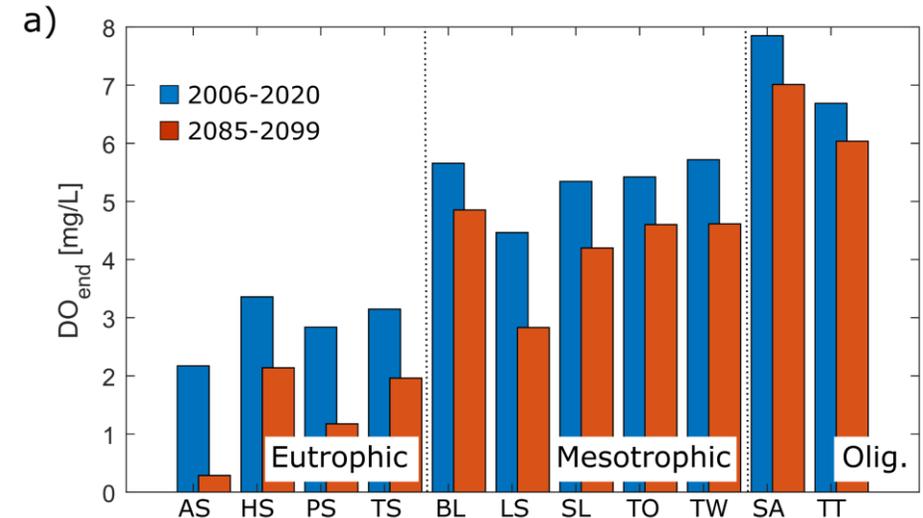
# Auswirkungen des Klimawandels auf Seen

In allen Seen sind am Ende der Schichtungsperiode Rückgänge in den Sauerstoffkonzentrationen zu erwarten.

**Stärkste O<sub>2</sub>-Verminderung tritt in eutrophen Seen auf.**

Verbesserung der Trophie um eine Stufe (durch Nährstoffreduktion) führt zur Verbesserung der Sauerstoffsituation selbst im pessimistischen Klimaszenario.

**Nährstoffreduktion kann negativen Klimaeffekt für O<sub>2</sub>-Gehalt im Tiefenwasser kompensieren.**



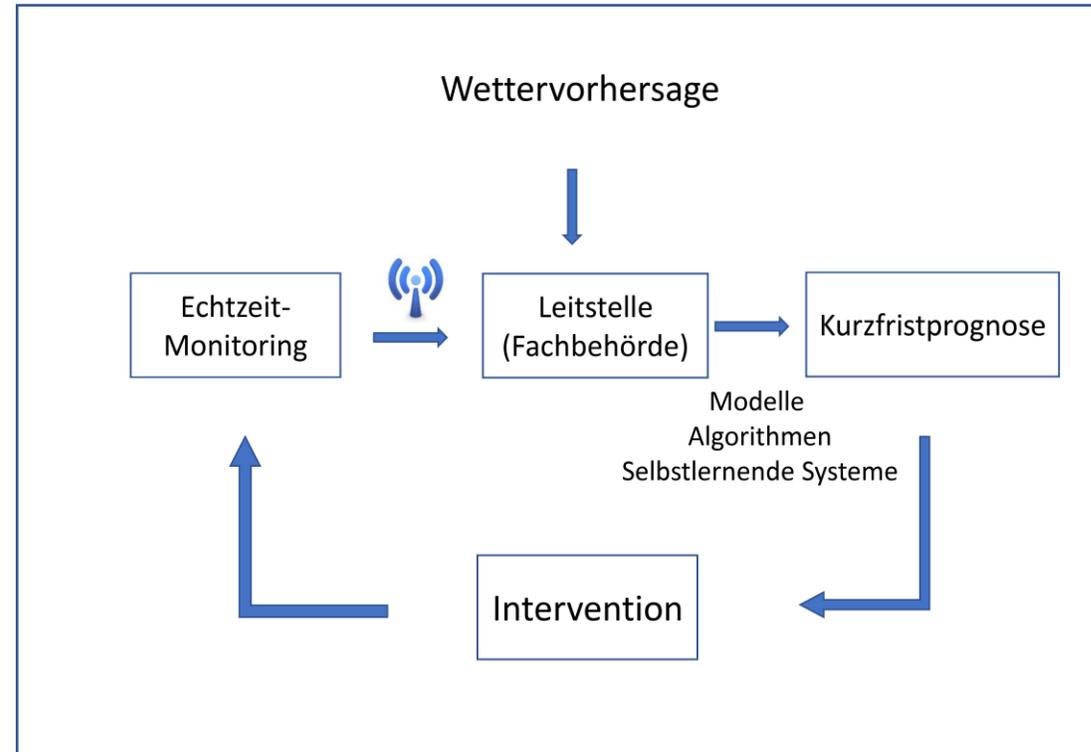
# Anpassungsstrategien: Frühwarnsysteme

## Methoden der Fernerkundung



Nutzungseinschränkungen  
durch Cyanobakterien

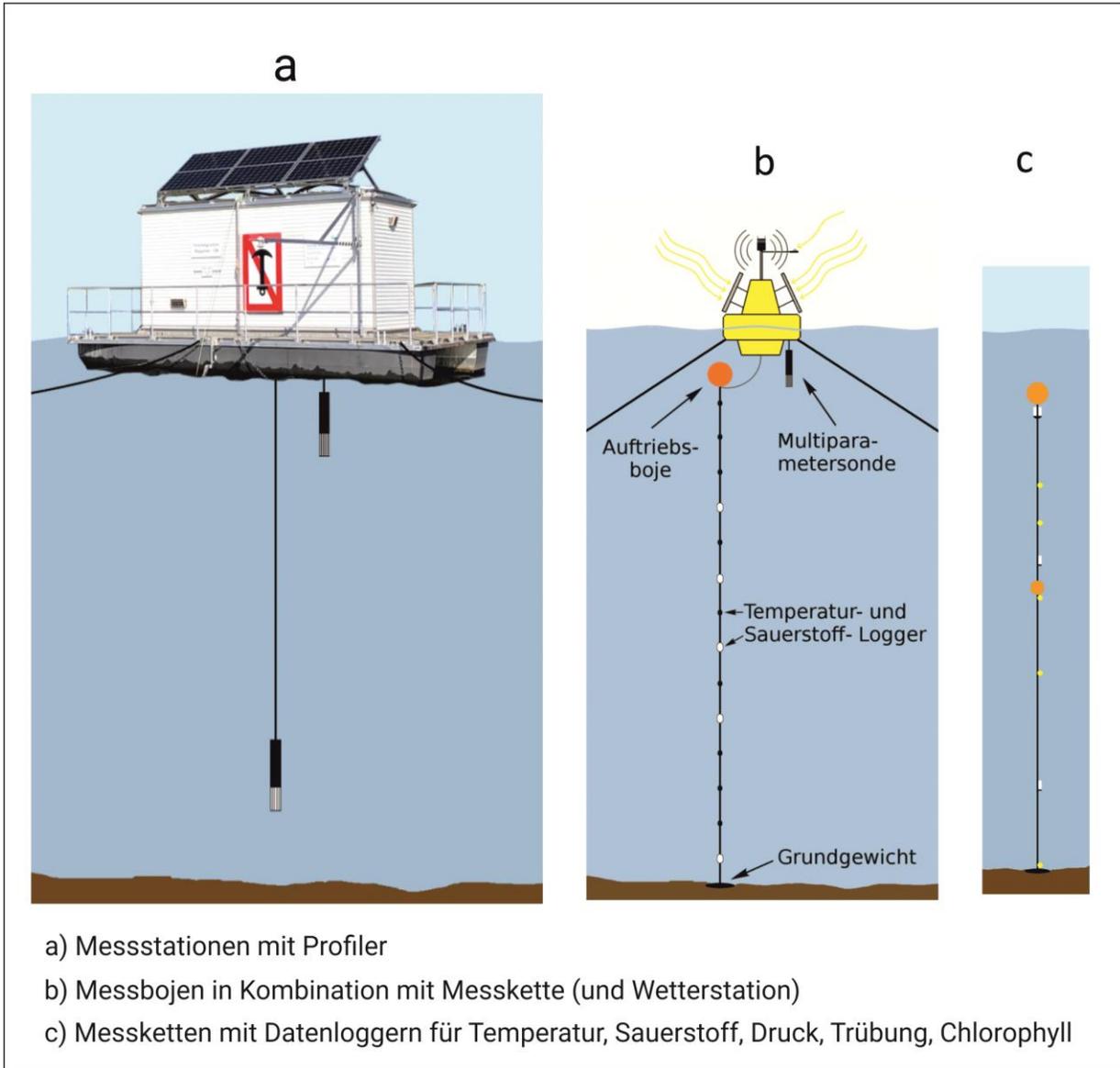
## Instrumentierung vulnerabler Gewässer



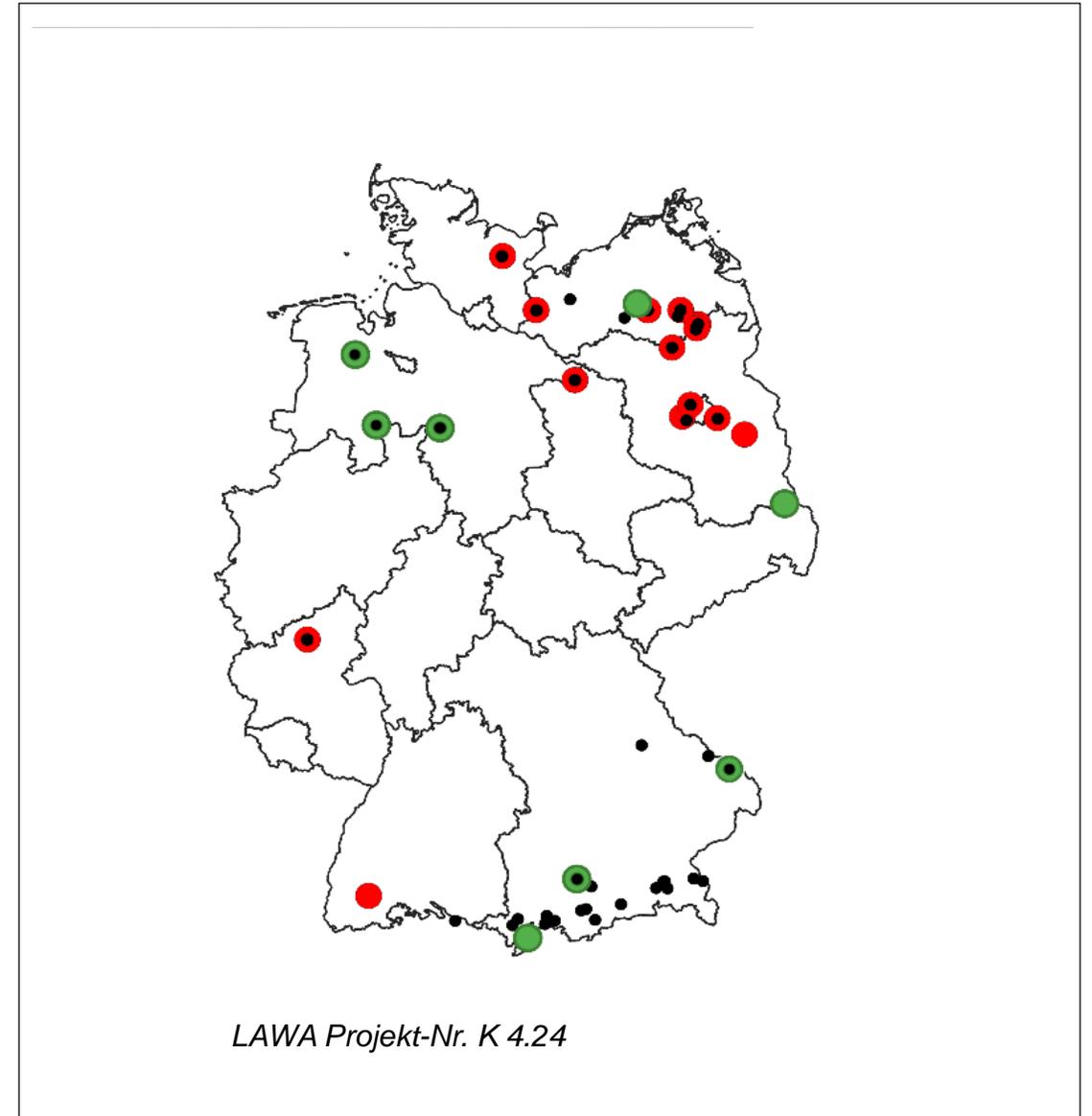
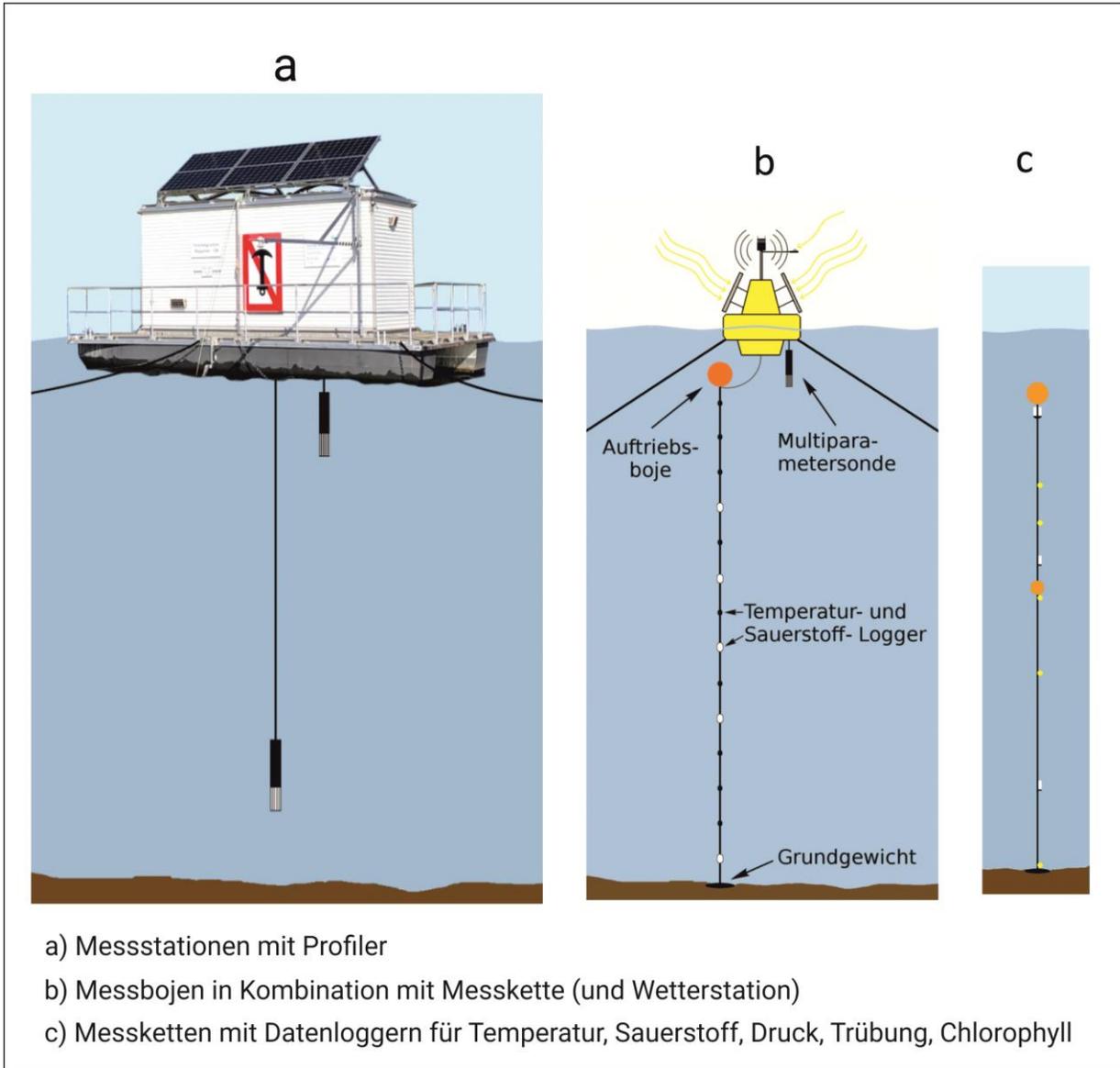
Belüftungssteuerung  
zur Verhinderung von Fischsterben



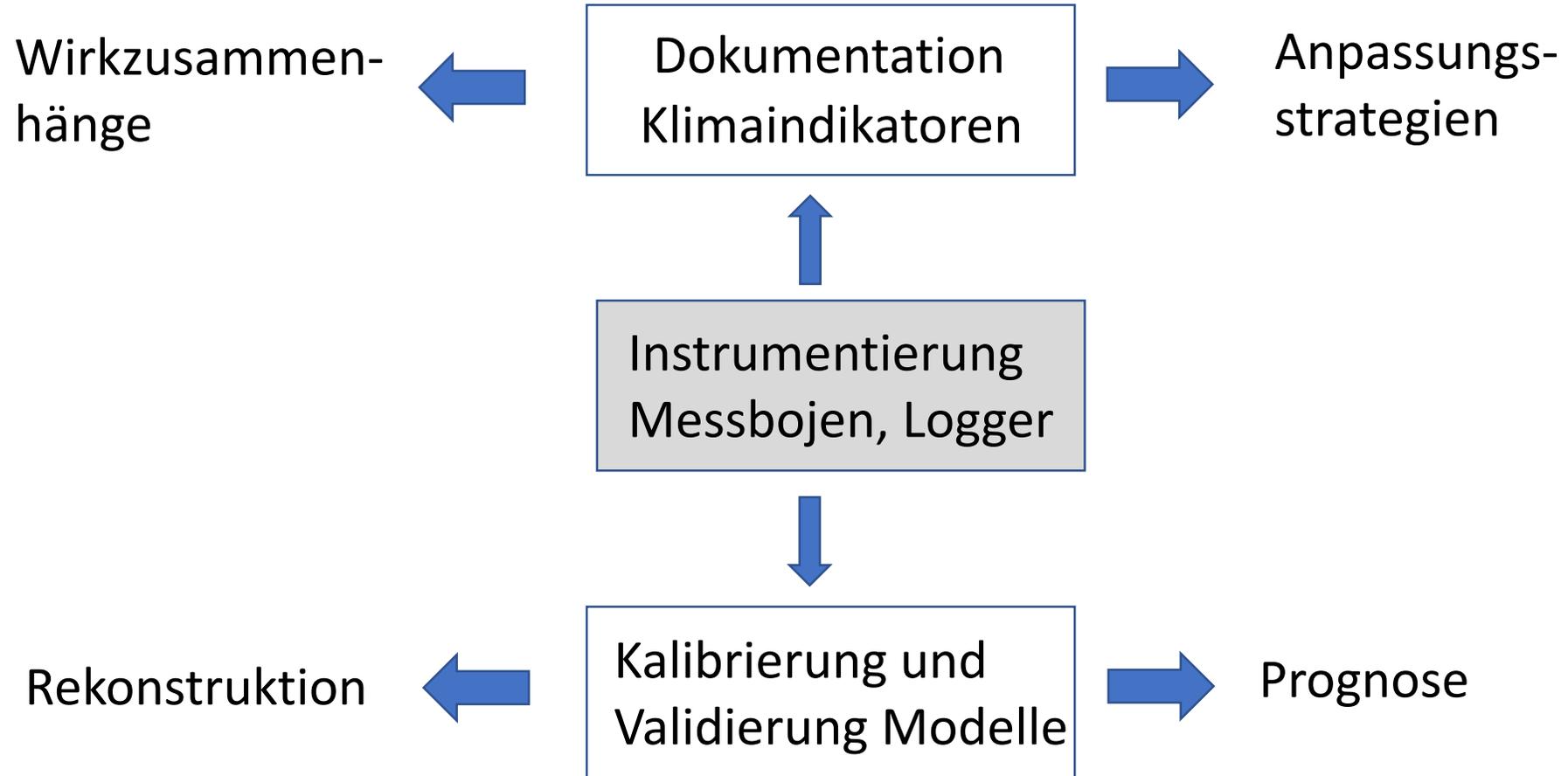
# Anpassungsstrategien: Klimamonitoring für Standgewässer



# Anpassungsstrategien: Klimamonitoring für Standgewässer



# Etablierung Klimamonitoring für Seen



Klimadaten ab 1960

Klimaprojektionen bis 2100

# Anpassungsstrategien: Dynamische Modelle für Talsperren und Seen

Feldbauer et al. *Environ Sci Eur* (2020) 32:48  
https://doi.org/10.1186/s12302-020-00324-7

Environmental Sciences Europe

RESEARCH Open Access

Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies

Johannes Feldbauer<sup>1\*</sup>, David Kneis<sup>1,2</sup>, Tilo Hegewald<sup>3</sup>, Thomas U. Berendonk<sup>1</sup> and Thomas Petzoldt<sup>1</sup>



**Methode:** Simulationen von Entnahmestrategien für Rohwasser und abfließendes Wasser in drei Trinkwassertalsperren auf die Temperatur und die Stratifikation.

**Praktischer Nutzen:** Ein Teil des Klimaeffektes kann durch Optimierung der Entnahme kompensiert werden. Wenig Effekt auf Oberflächentemperatur, Eis und Beginn der Schichtung

Science of the Total Environment 748 (2020) 141366

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Ensemble warming projections in Germany's largest drinking water reservoir and potential adaptation strategies

Chenxi Mi<sup>a,b,\*</sup>, Tom Shatwell<sup>a</sup>, Jun Ma<sup>c</sup>, Yaqian Xu<sup>c</sup>, Fangli Su<sup>b</sup>, Karsten Rinke<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Helmholtz Centre for Environmental Research, Department of Lake Research, Magdeburg, Germany  
<sup>b</sup> College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China  
<sup>c</sup> Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-Lakes and Algal Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan, China



**Methode:** Modellierung verschiedener Bewirtschaftungsszenarien auf der Basis von Klimaprojektionen bis 2100.

**Praktischer Nutzen:** Mehr Oberflächenentnahme verhindert die Erwärmung des Oberflächen- und des Tiefenwassers. Bei RCP 2.6 (hoher Klimaschutz) sind keine Anpassungen notwendig.

water MDPI

Article

Climate Change Demands Adaptive Management of Urban Lakes: Model-Based Assessment of Management Scenarios for Lake Tegel (Berlin, Germany)

Robert Ladwig<sup>1,2,\*</sup>, Eiichi Furusato<sup>3</sup>, Georgiy Kirillin<sup>1</sup>, Reinhard Hinkelmann<sup>2</sup> and Michael Hupfer<sup>1</sup>

**Methode:** Modellierung verschiedener Bewirtschaftungsszenarien auf der Basis von Klimaprojektionen bis 2100.

**Praktischer Nutzen:** Die Phosphoreliminationsanlage gewinnt bei der Verhinderung hoher Nährstoffkonzentrationen und von Cyanobakterien an Bedeutung.

# Anpassungsstrategien

## Neue Informationswerkzeuge

### Fernerkundung und Sensoren

Real-time Monitoring

Sicherung der Funktionen besonders sensibler Ökosysteme

### Modelle

Praxistaugliche Modelle für Kurz- und Langfristprognosen

## Reduzierung von Nähr- und Schadstoffeinträgen

### End-of-pipe Maßnahmen

Puffersysteme, Phosphorfällung im Zufluss, Vorsperren

### Umleitung (Bypassing)

Verhinderung von Stoßbelastung bei Starkregenereignissen

### Entnahmestrategie

Tiefervariable Wasserentnahme (Temperatur und Nährstoffe)

## Operative Maßnahmen

### Unterhaltung

Symptombekämpfung, Havariebekämpfung

### Erhöhung der Speicherkapazitäten

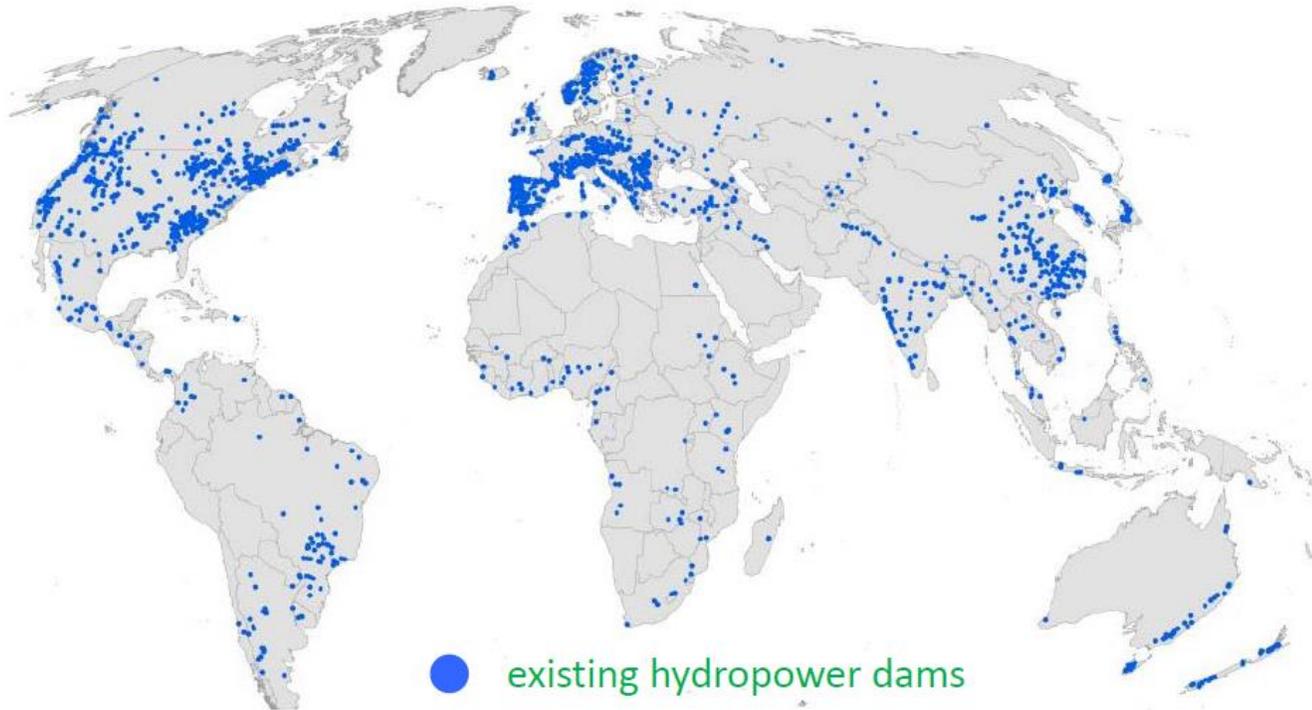
Erhöhung Wasserrückhalt in der Landschaft, künstliche Grundwasseranreicherung

### Fremdwasserzuführung

Verbindung von Versorgungssystemen, Überleitung

# Rückwirkung von Gewässern auf das Klima

Große Talsperren 45.000



Zarfl et al. (2015), *Aquatic Sciences*



400.000 km<sup>2</sup>



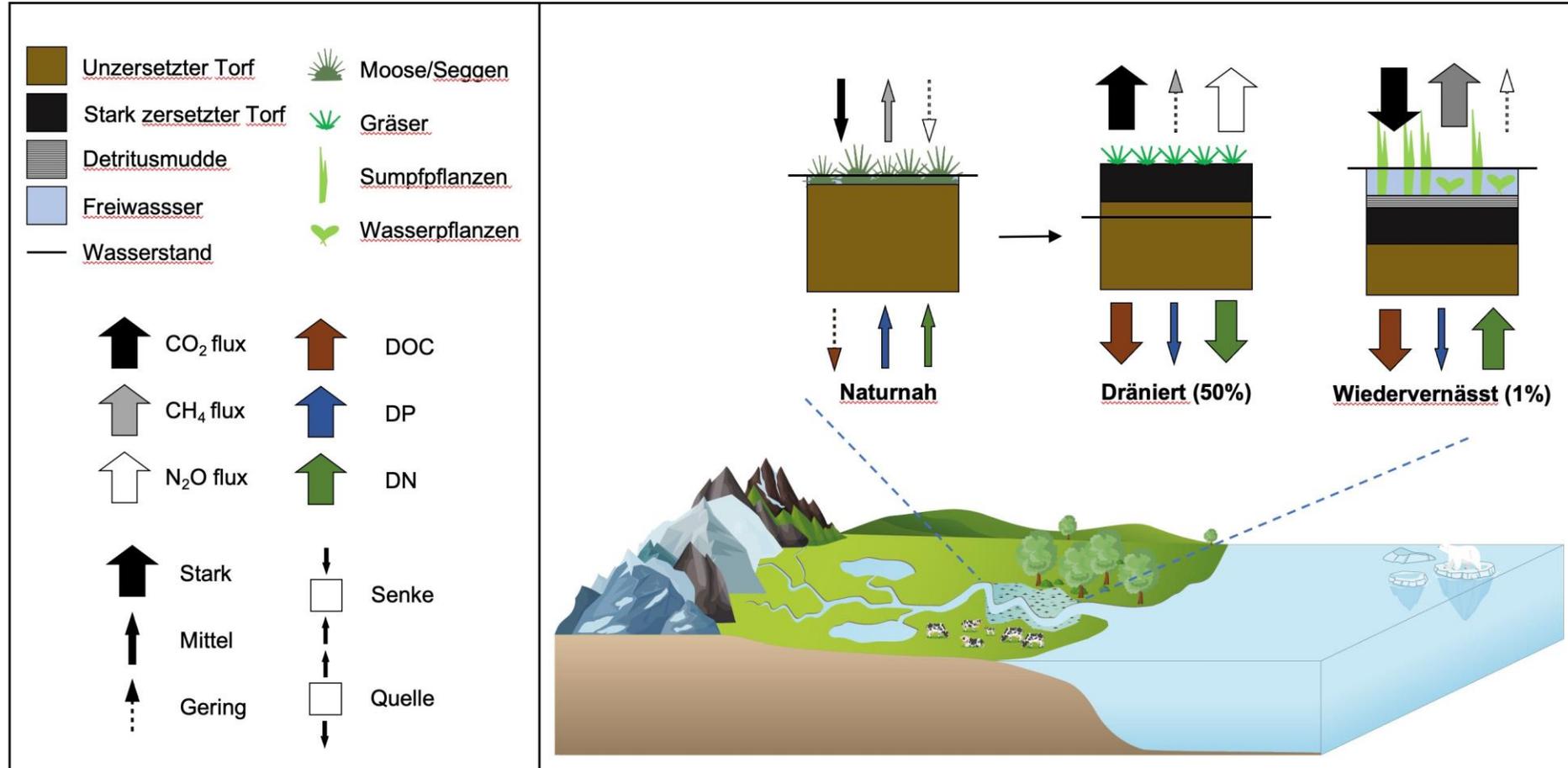
1 Mill. km<sup>2</sup>

bis 2050

Freisetzung von CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) , CH<sub>4</sub> (Methan) und N<sub>2</sub>O (Lachgas).

Dazu tragen nicht nur große Talsperren bei, sondern auch kleine Stauhaltungen („Schornsteine“ in der Landschaft). Es gibt 7800 kleine Wasserkraftwerke in Deutschland.

# Rückwirkung von Gewässern auf das Klima



Zak (2021), DWA 606 (2024)

Die Wiedernässung von Mooren führt zur verstärkten Methanfreisetzung.



# Auswirkungen der Energiewende auf Gewässer

## Schwimmende PV-Anlagen



Foto: O&L Nexentury

Philippsee in Bad Schönborn (BW)

## Thermische Seewassernutzung (Hydrothermie)



[www.JeanRichard.photo](http://www.JeanRichard.photo)

Zürichsee (CH)



# Gewässerökosysteme im Klimawandel

Geschädigte Gewässerökosysteme reagieren empfindlicher auf den Klimastress. Die Erreichung des guten ökologischen Zustandes erfordert noch mehr Anstrengungen z.B. zur Reduzierung der Nährstoffeinträge.

Das Management von Gewässern wird zunehmend auf die Abwehr von Klimafolgen ausgerichtet werden. Engere Verbindung von Gewässergüte- und Wassermengensteuerung.

Zur Abwendung klimabedingter ökologischer „Katastrophen“ sowie für die Vorhersage ökologischer Zustände müssen moderne Monitoringmethoden und praxisorientierte Modellwerkzeuge implementiert werden.

Die thermische Seewassernutzung und die Nutzung von Seeflächen für Photovoltaik erfordert noch bessere limnologische und rechtliche Grundlagen.



# Dank



Messstation am Müggelsee

## Finanzierung und Partner

