



**IGB**

Leibniz-Institut für Gewässerökologie  
und Binnenfischerei

# Seen im Klimawandel: Beobachtungen und modellgestützte Prognosen

Robert Schwefel

19. 01. 2023



# Seen im Klimawandel

- Seenphysik:  
*Thermische Schichtung und ihre Auswirkung auf das Ökosystem.*
- Seenbeobachtung:  
*Methoden und Ergebnisse von Langzeitmessungen.*
- Seenmodellierung:  
*Wie entwickeln sich die Temperaturen im 21. Jahrhundert?*
- Fazit:  
*Welche Folgen haben diese Entwicklungen auf das Ökosystem?*



<http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/projektberichte/lawa/#AK>

# Seenphysik

Ein Blick unter die Oberfläche ist nötig

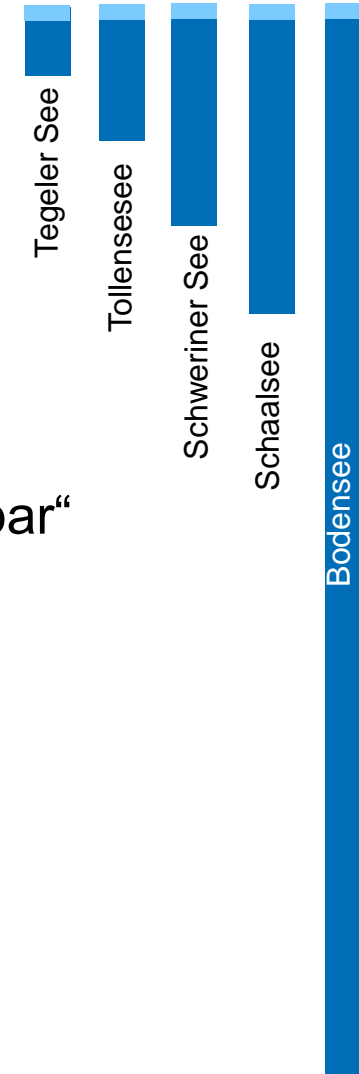


Tegelersee, Berlin



≈ 3m  
sichtbar

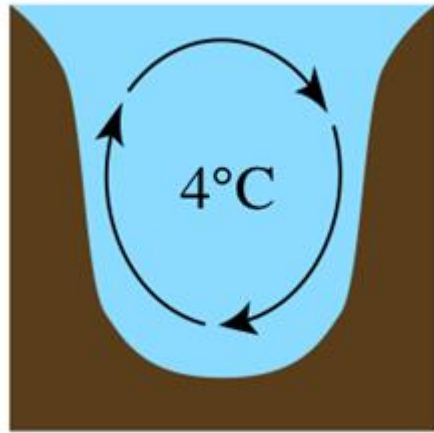
≈ 13m  
„unsichtbar“



# „Jahreszeiten“ der Seen

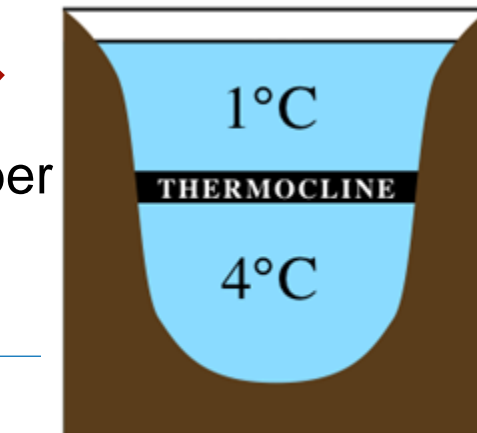
## Frühling:

Der See ist vollständig durchmischt



## Winter

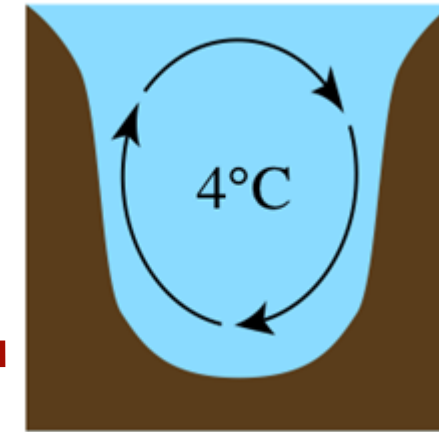
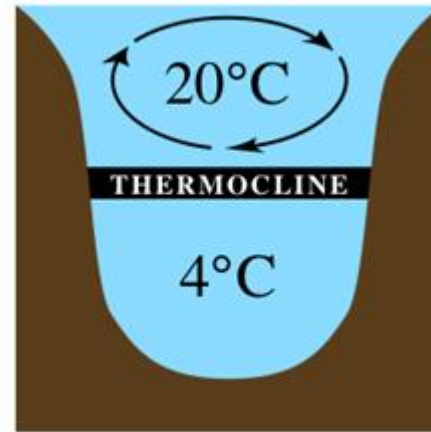
Weitere Abkühlung.  
Leichtes, kaltes Wasser liegt über „warmen“ Tiefenwasser.  
Eventuell Eisbedeckung.



In vielen Seen findet keine Winterschichtung statt.

## Sommer:

Die Oberfläche erwärmt sich.  
Leichtes, warmes Oberflächenwasser ist vom Tiefenwasser getrennt.



## Herbst:

Die Oberfläche kühlt wieder ab, der See mischt ein zweites Mal.

## Was bedeuten diese Jahreszeiten für den See?

- Bei der Durchmischung im Frühling und Herbst gelangt Sauerstoff in das Tiefenwasser. Findet die Durchmischung zu spät statt, gehen den Lebewesen „die Luft aus“.
- Umgekehrt werden an der Oberfläche im Sommer oft mehr Nährstoffe verbraucht, als durch Zuflüsse in den See gelangen. Im Frühling und Herbst wird im Tiefenwasser gespeichertes Material an die Oberfläche transportiert.
- Im Winter sorgt die Winterschichtung für stabile Temperaturverhältnisse im Tiefenwasser, birgt in arktischen Regionen aber auch Risiken („winterkills“)

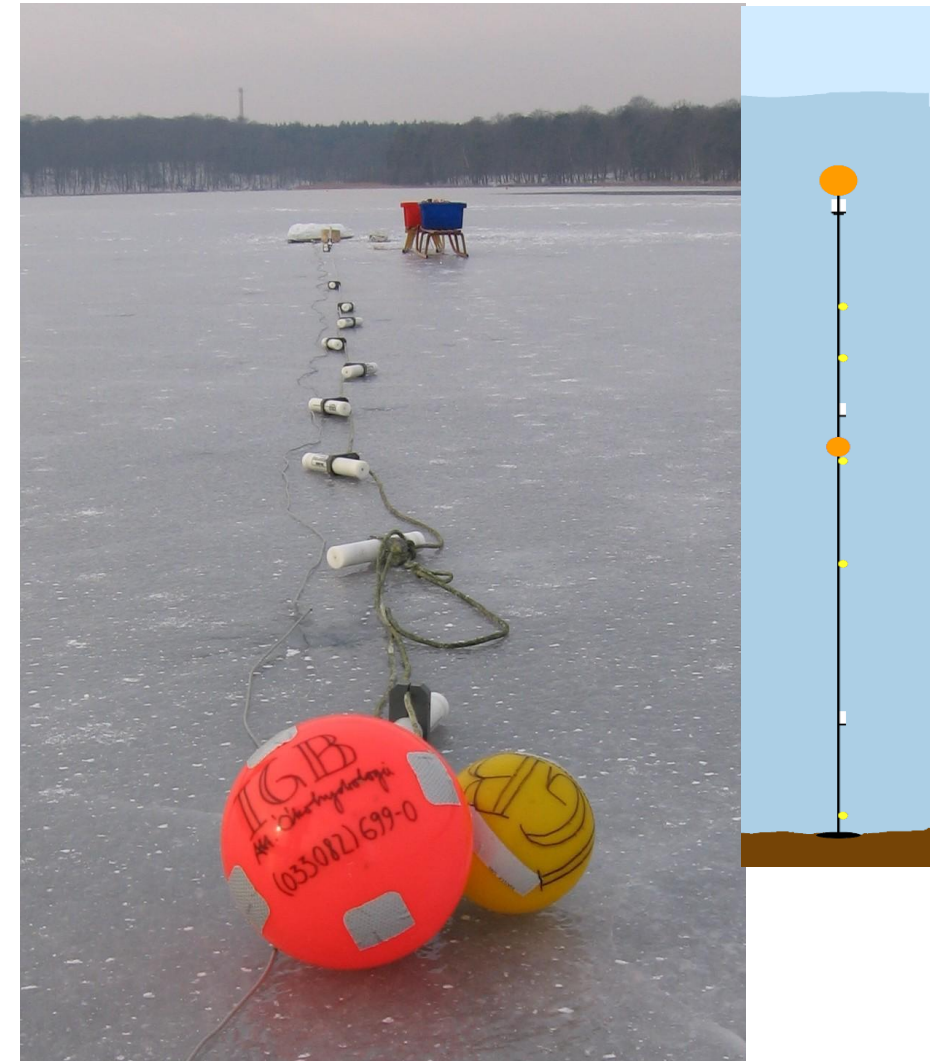


# Wie werden die Seen untersucht?

- Regelmäßige Terminmessungen

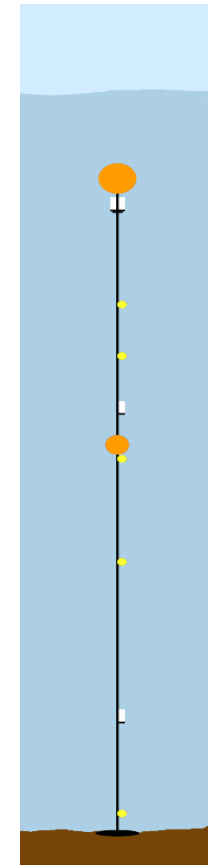


- Kontinuierliche Messungen mit Datenloggern

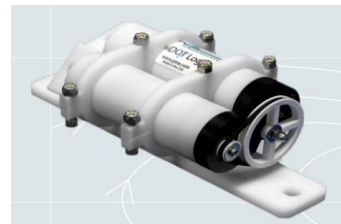


# Wie werden die Seen untersucht?

- Regelmäßige Terminmessungen

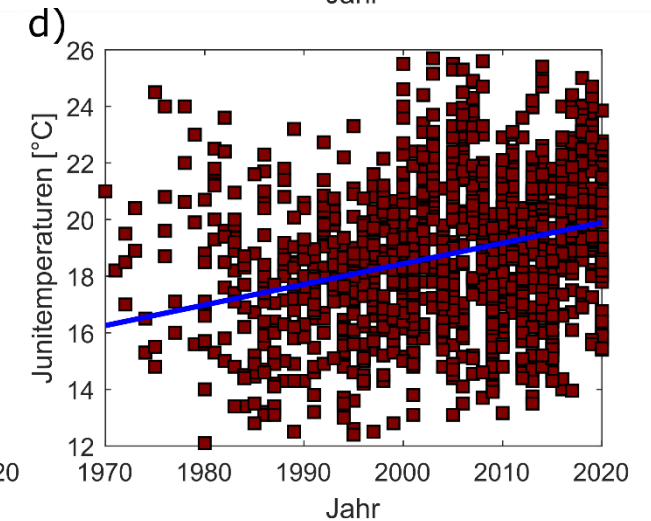
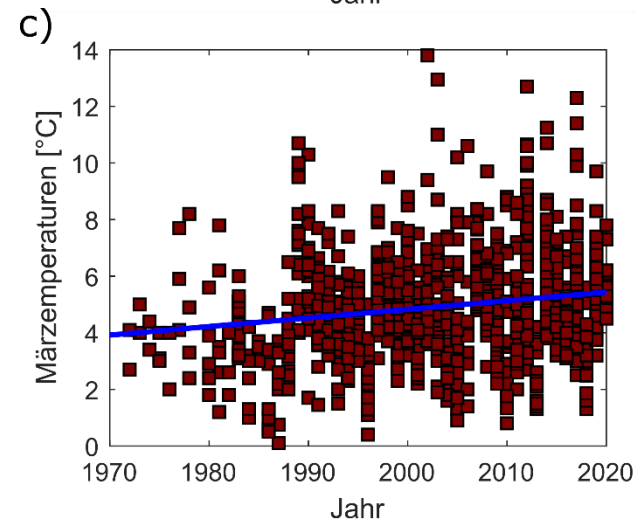
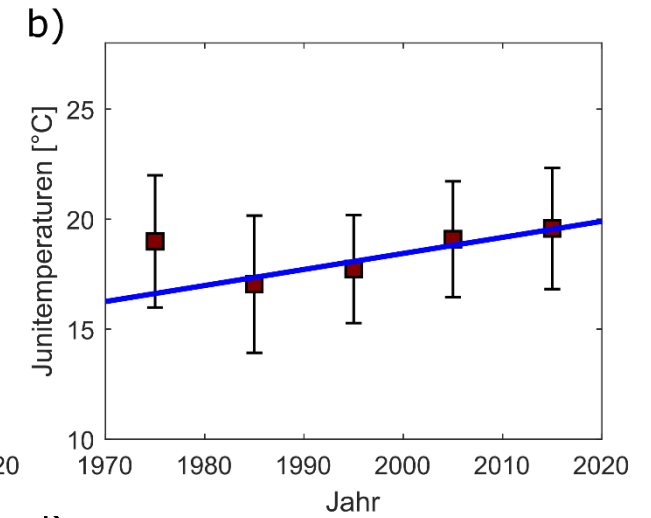
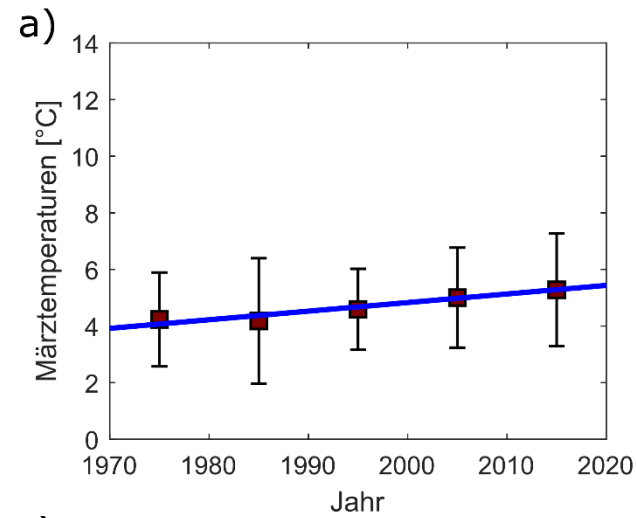
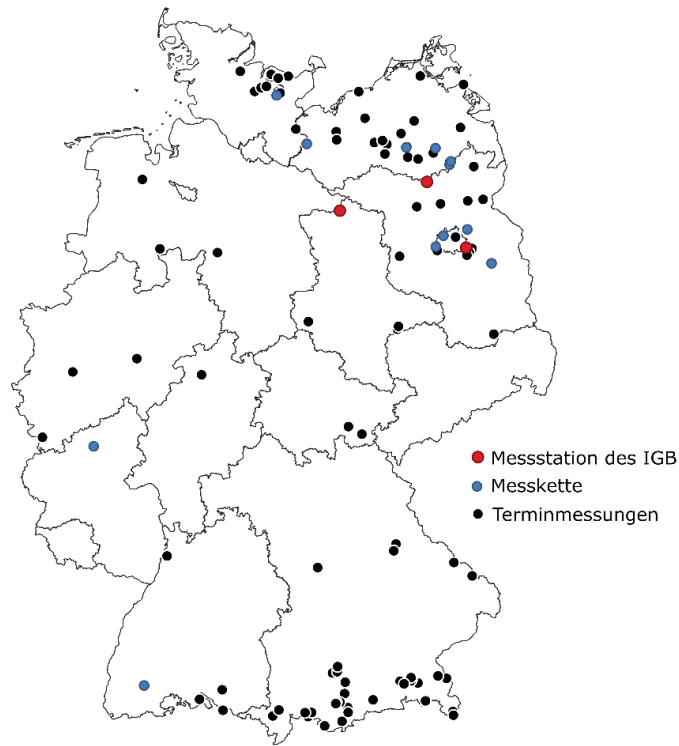


- Kontinuierliche Messungen mit Datenloggern



# Historische Daten

## Ergebnisse von Langzeitmessungen 1970 - 2020

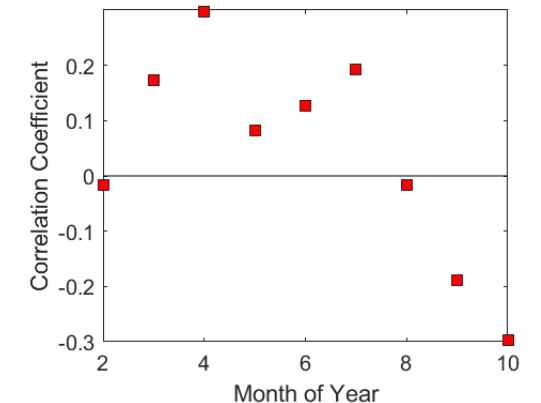
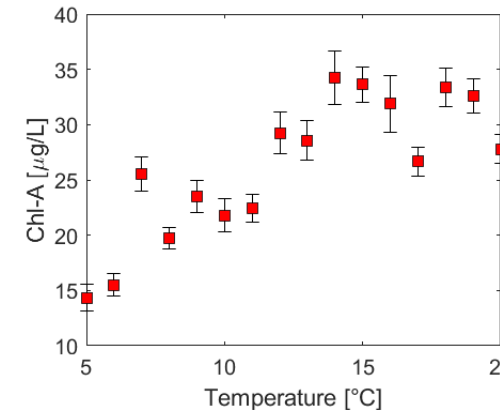
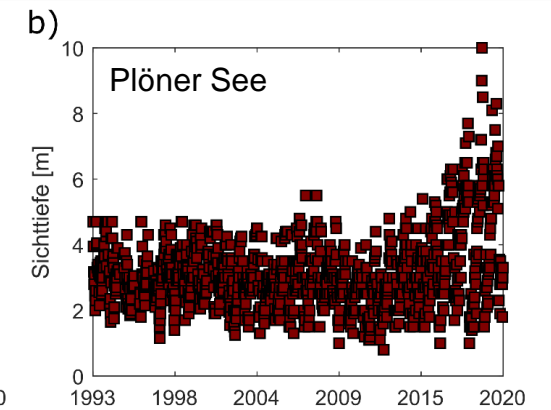
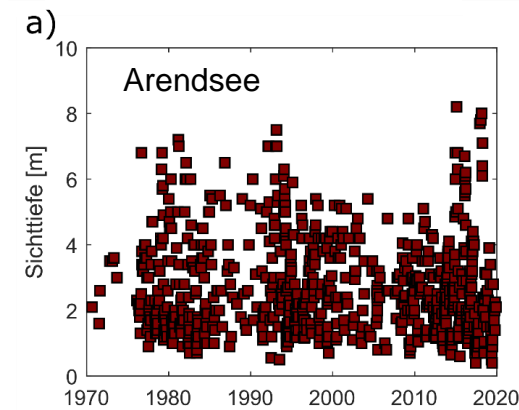
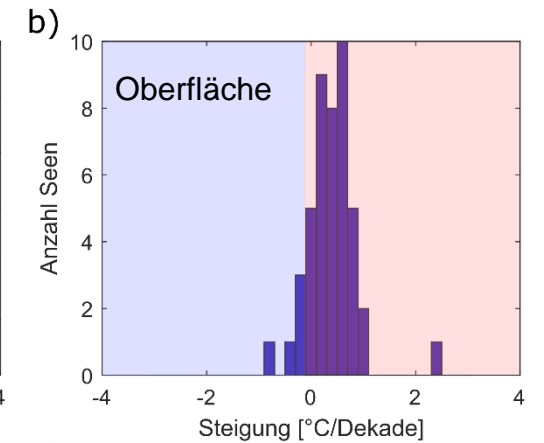
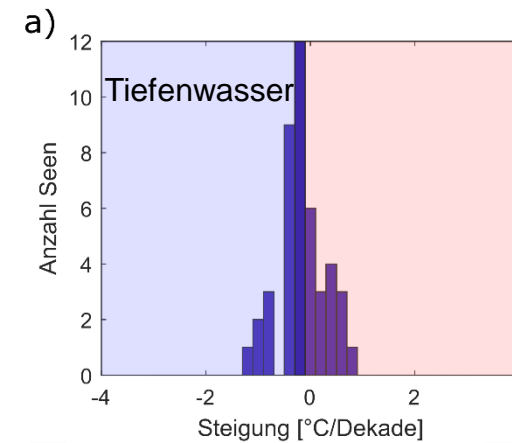




# Historische Daten

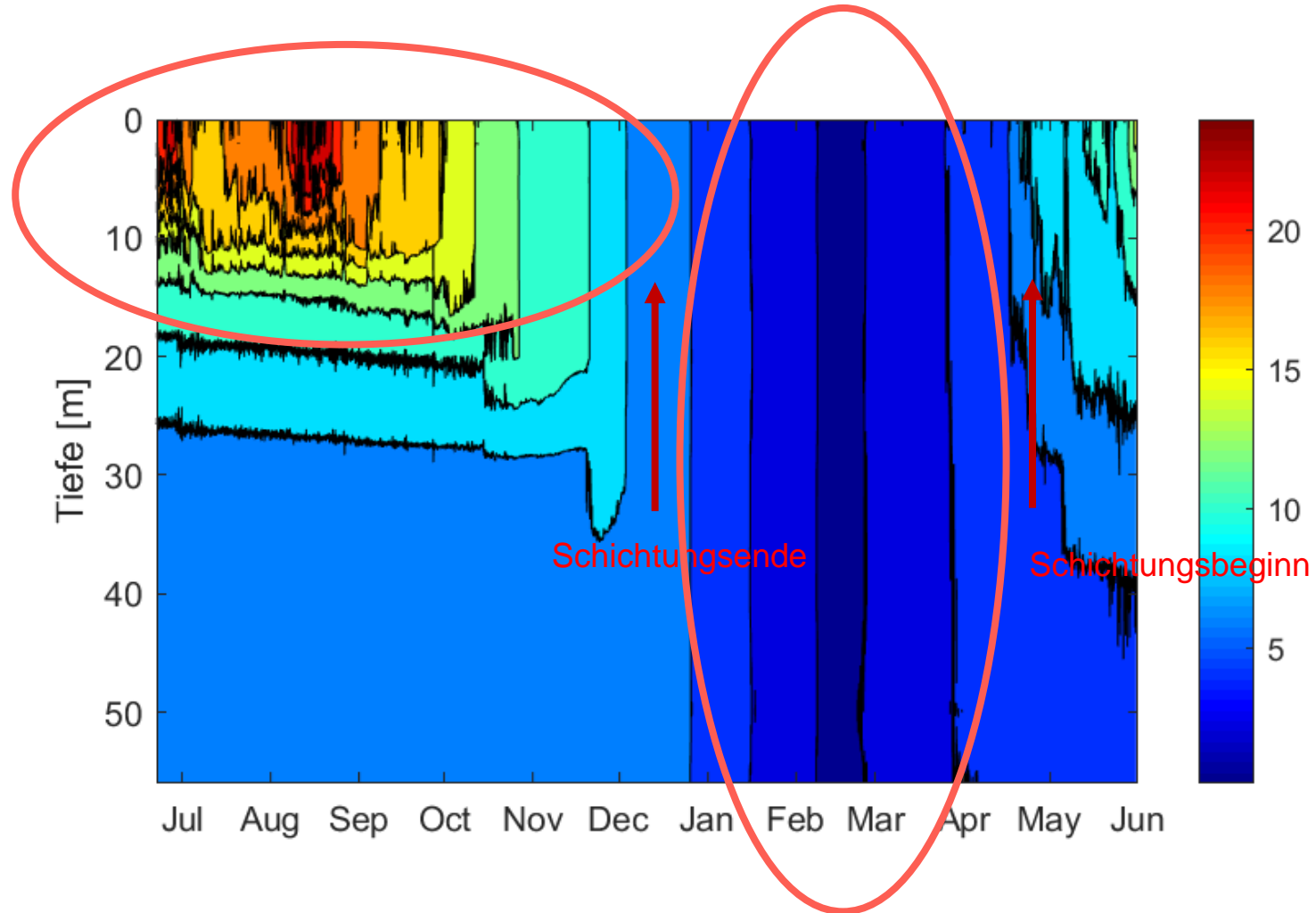
## Ergebnisse von Langzeitmessungen 1970 - 2020

- Oberfläche erwärmt sich stärker als Tiefenwasser => Stärkere Schichtung.
- Andere Parameter variieren stark.
- Produktivität steigt mit Temperatur, aber Effekt der Nährstoffe überwiegt.
- Änderungen möglicherweise saisonal unterschiedlich.

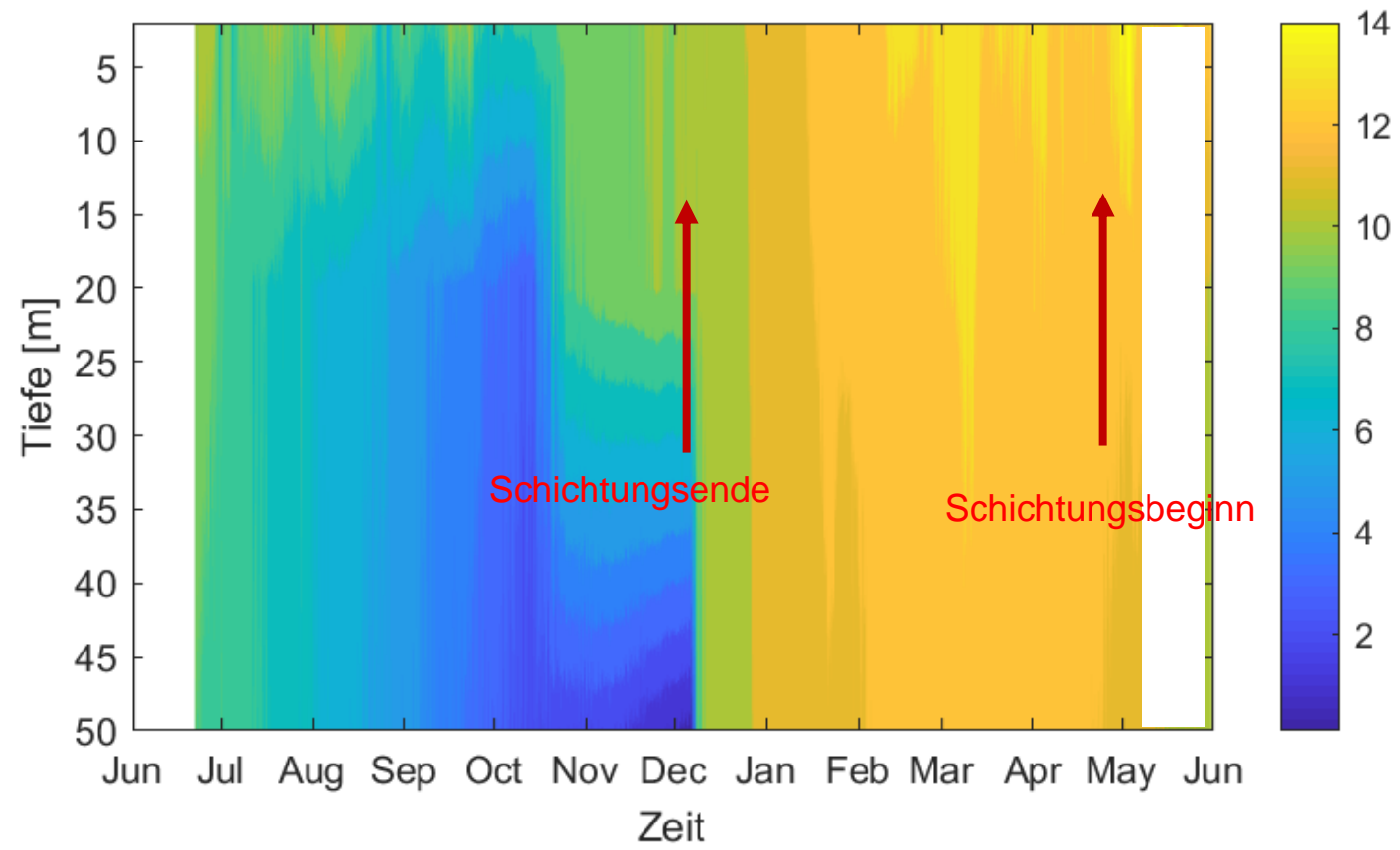


# Beobachtungen anhand hochaufgelöster Messdaten

Beispiel: Temperatur Breiter Luzin

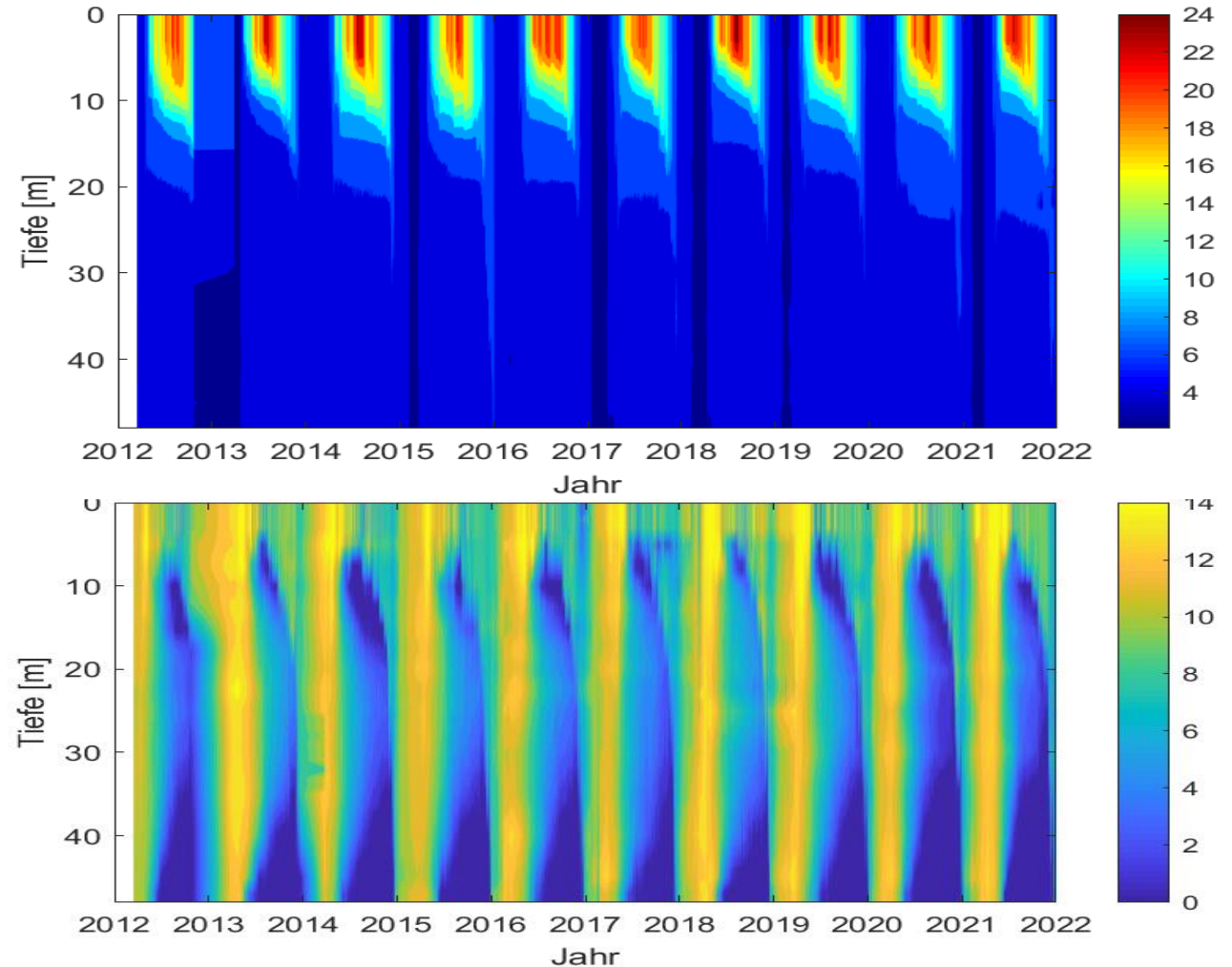


# Sauerstoff Breiter Luzin



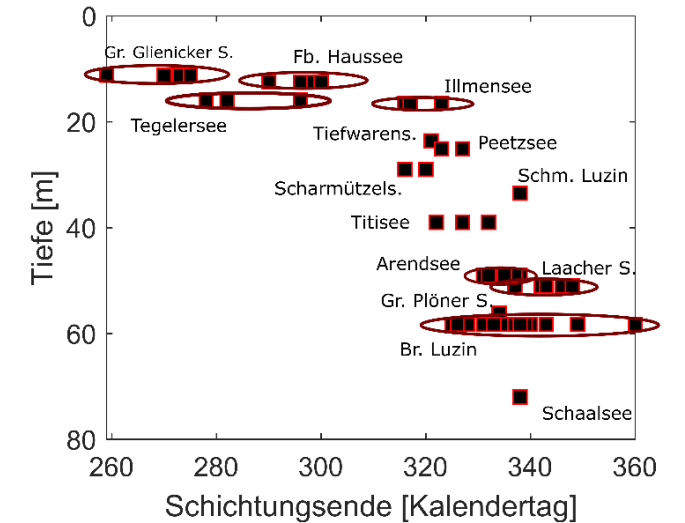
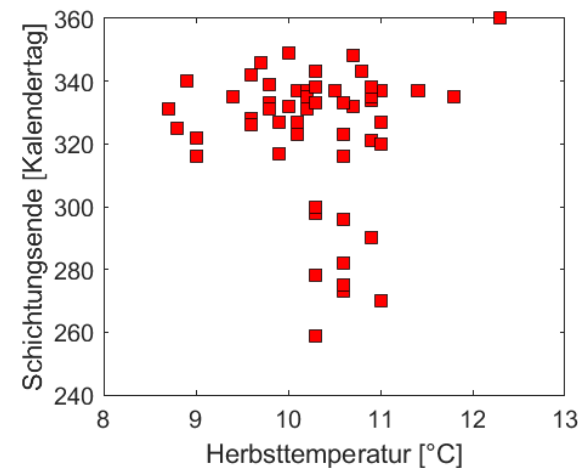
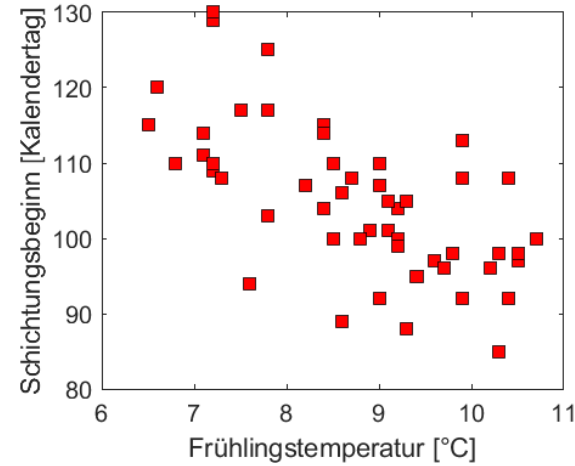
# Langzeitdaten Arendsee

- Längere Zeitreihen erlauben Analyse von Trends.
- Trennung von Klimaeffekten von anderen Einflussfaktoren häufig kompliziert.
- Zeitreihen meist noch relativ kurz.
  - => Kombination von Daten mehrerer Seen
  - => Modellierung



# Kombination von Daten mehrerer Seen

- Schichtungsbeginn abhängig von Lufttemperatur.
- Schichtungsende zeigt größere Variabilität und geringere Temperaturabhängigkeit.



# Numerische Modelle zur Vorhersage möglicher Änderungen

## Initialisierung

### Modellauswahl

Modelltyp  
Modellierte Parameter

### Seenauswahl

Morphometrie  
Wind Fetch  
Geographische Lage

## Forcing

### Meteorologie

Entweder Messungen  
oder Wettermodell.

### Transparenz

Je nach Modell zeitlich  
variabel oder konstant.

### Zufluss/Abfluss

Nur relevant bei kurzen  
Aufenthaltszeiten.

## Kalibrierung

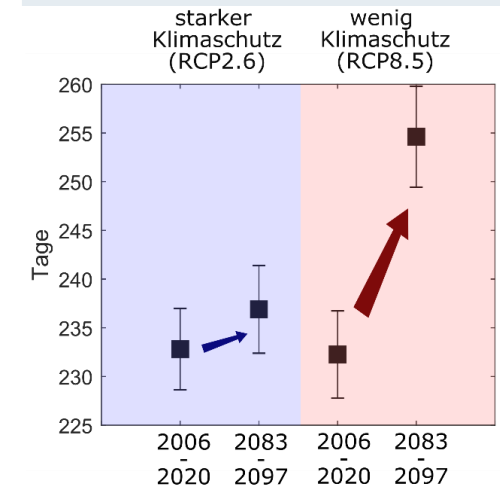
### Vergleich mit Messwerten

Möglichst viele und  
hochaufgelöste  
Messdaten notwendig.

Metriken:

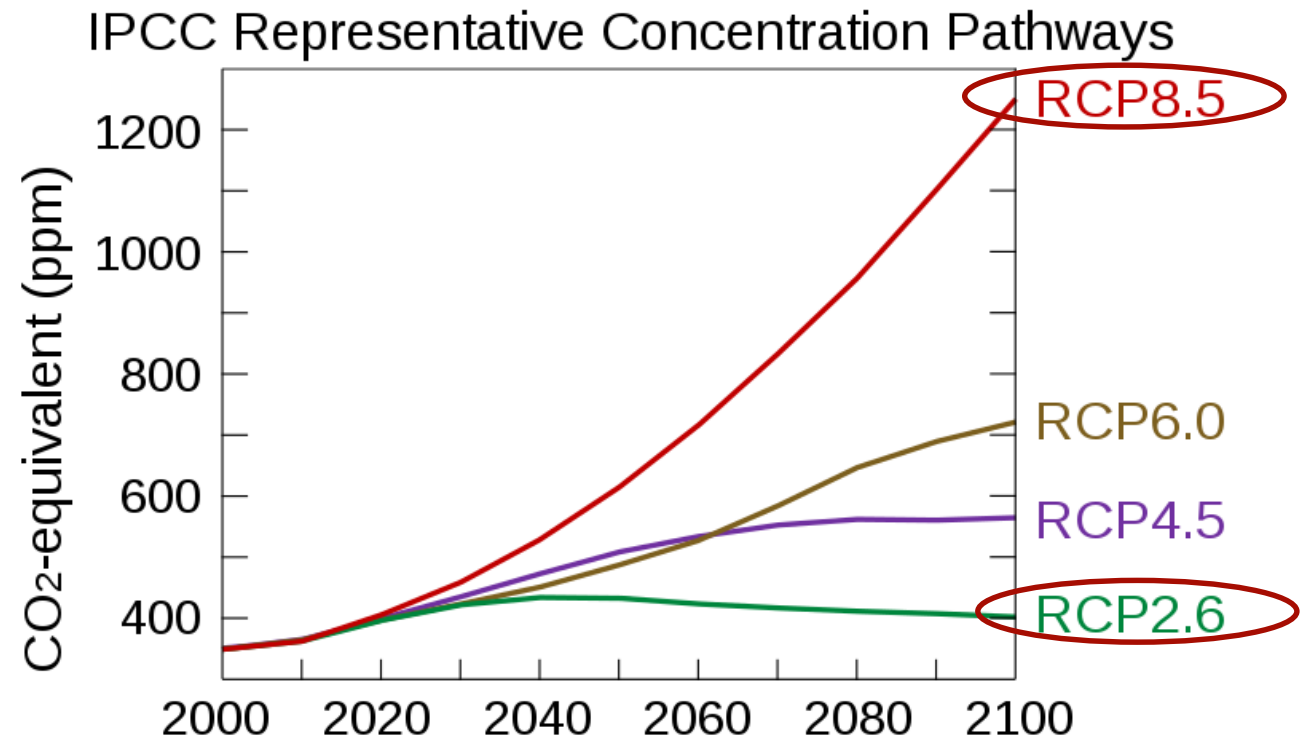
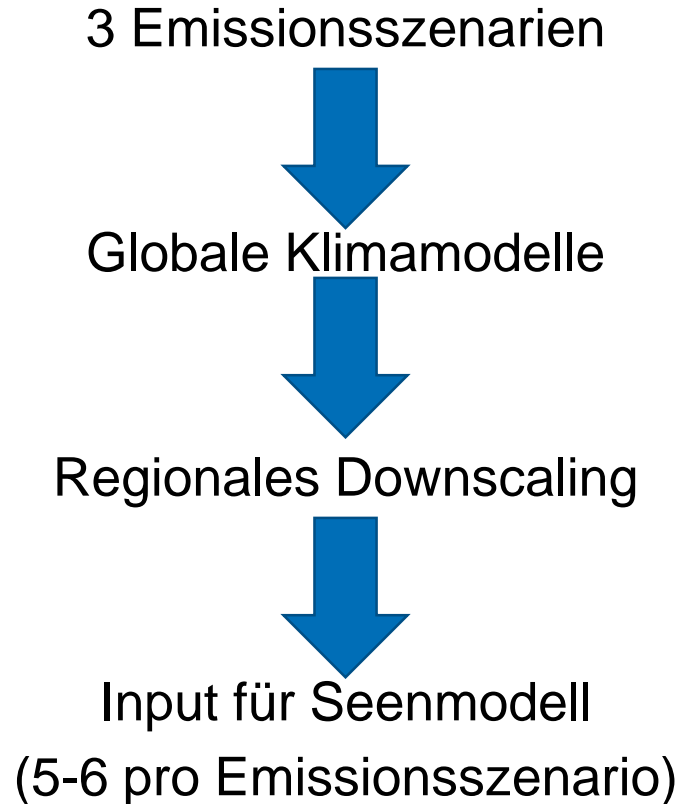
- bias
- Root mean square error

## Ergebnisse



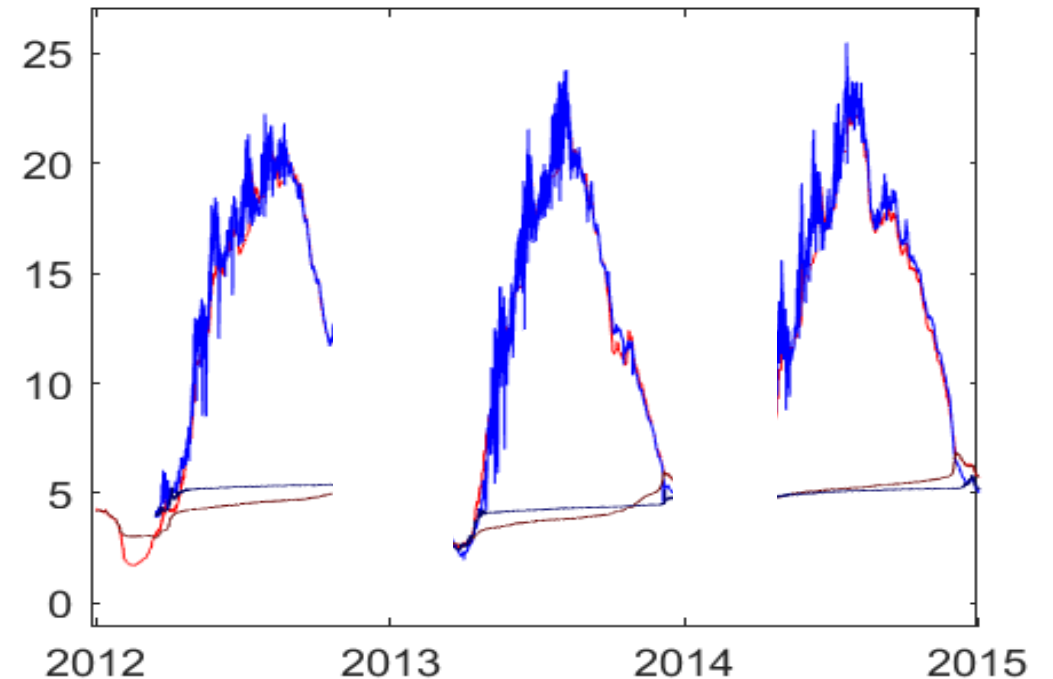
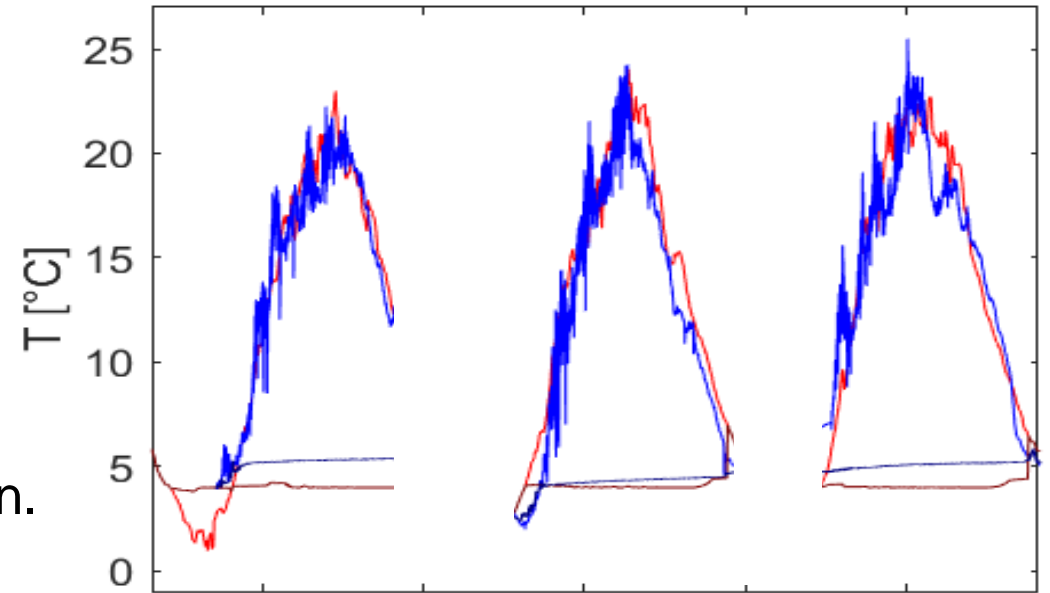
# „Blick in die Zukunft“

Prognose abhängig von zukünftiger Entwicklung der Treibhausgase



# Kalibration mit Messdaten

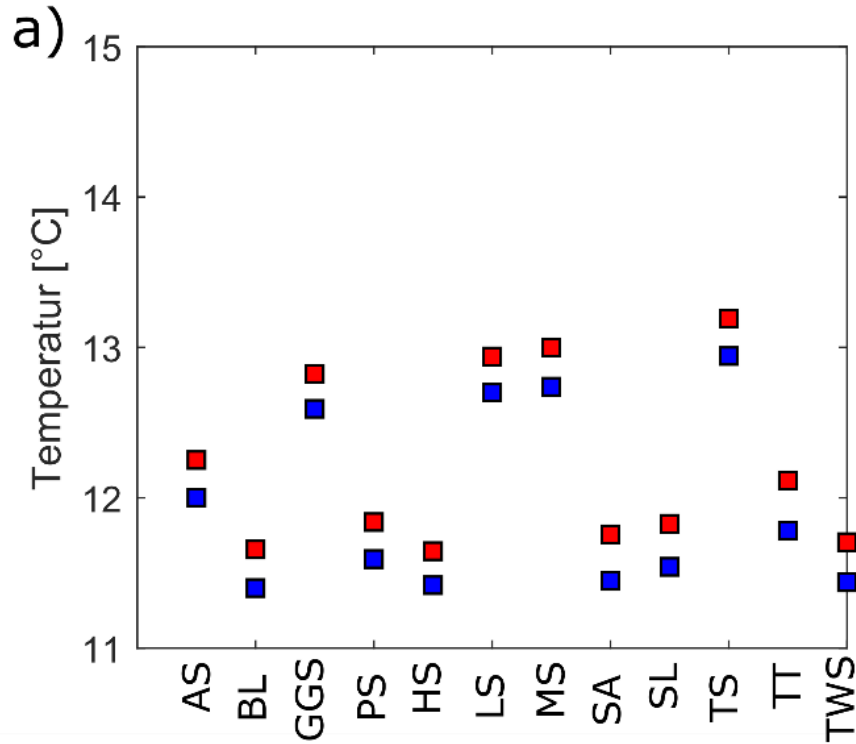
- Modell läuft mit real gemessenen Wetterdaten in Perioden, für die Messdaten vorliegen.
  - Wetter: Nächste vorhandene Wetterstation.
  - Daten der Messketten.
  
- Root mean square error misst die Abweichung zwischen Modell und Messungen:
  - Simstrat: 0.84 (Oberfläche)  
0.58 (Tiefenwasser)
  - FLake: 1.23 (Oberfläche)  
1.00 (Tiefenwasser)





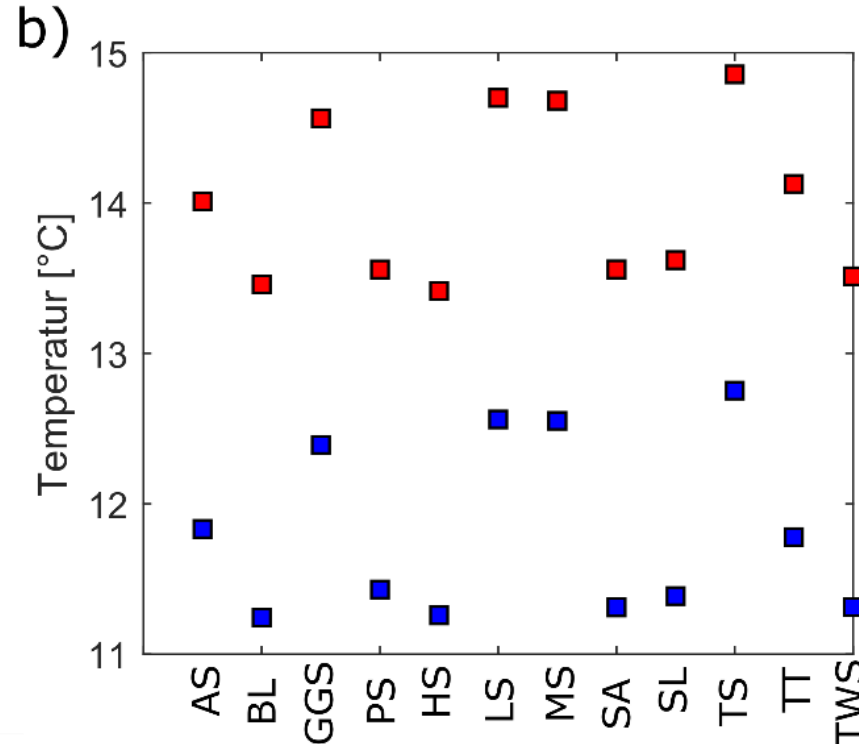
# Ergebnisse der Seenmodellierung mit FLake

Änderung der Temperaturen 2006-2100



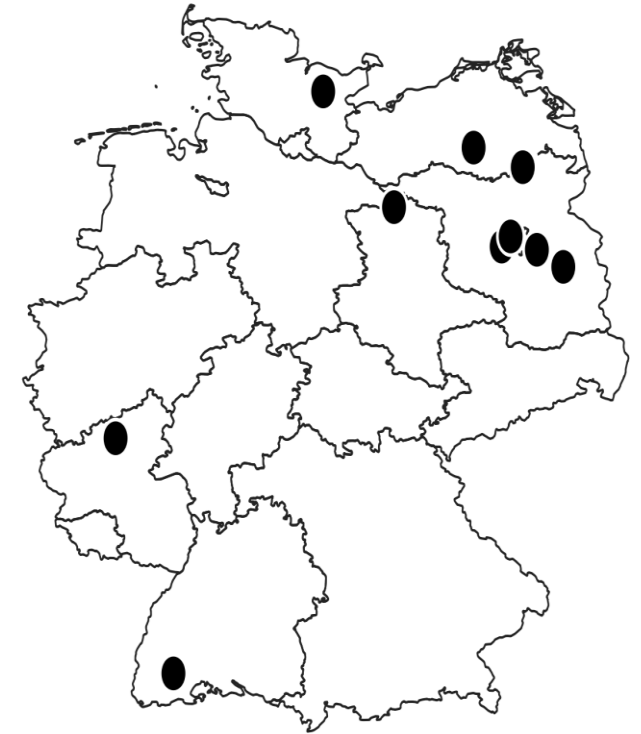
RCP 2.6

(starker Klimaschutz)



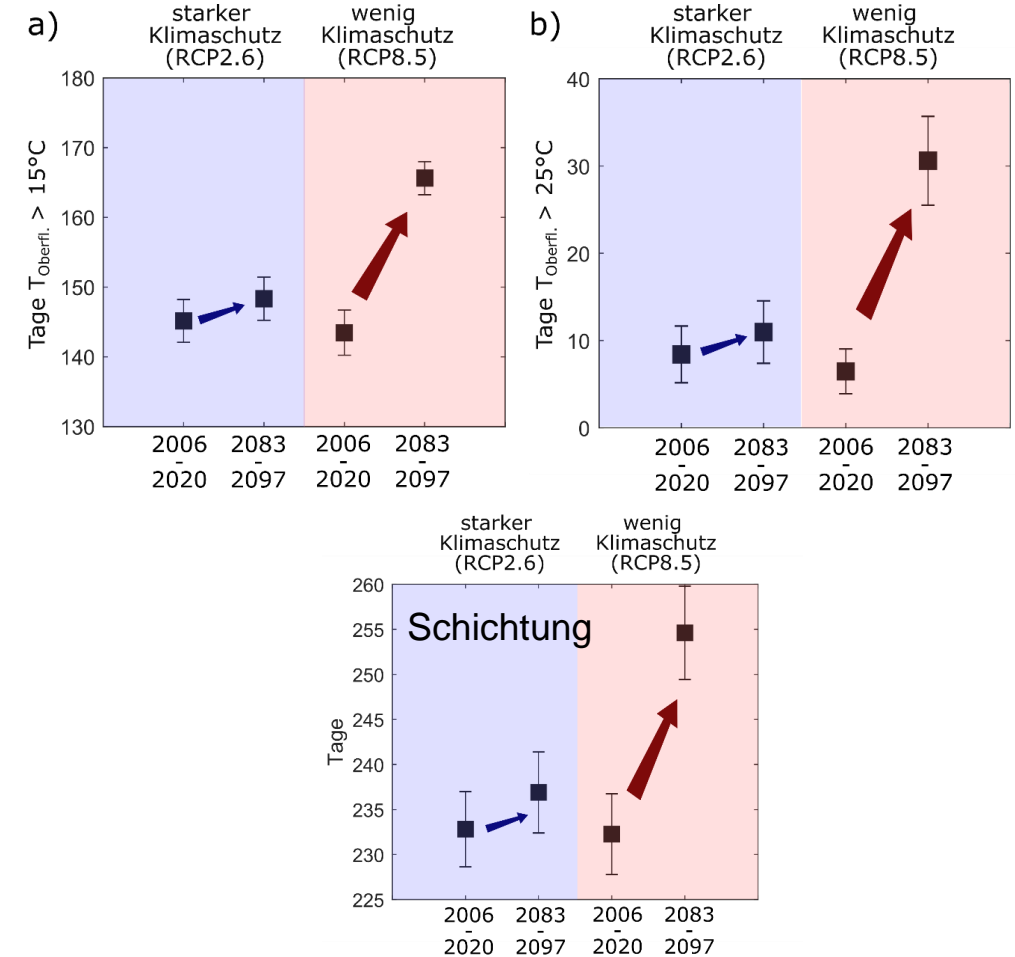
RCP 8.5

(wenig Klimaschutz)



# Entwicklung der Temperaturen und der Schichtung

- Oberflächentemperaturen steigen um ca. 2°C im „business-as-usual“-Szenario (RCP 8.5), aber nur um 0.2°C im Szenario mit starkem Klimaschutz (RCP 2.6).
- Tage mit extremen Temperaturen steigen stark an.
- Tiefenwassertemperaturen steigen ebenfalls, aber weniger stark.
- Sommerliche Schichtung verlängert sich, dagegen verkürzt sich die Winterschichtung.
- Tiefere Seen ändern ihr Schichtungsverhalten und mischen nur noch 1x pro Jahr („monomiktisch“) statt 2x.



# Auswirkungen auf das Ökosystem

- Höhere Temperaturen und stabilere Schichtung begünstigen das Wachstum von Cyanobakterien.
- Früheres Einsetzen der Sommerschichtung kann die Planktonsukzession beeinflussen. Umgekehrt kann spätere Mischung im Herbst den Eintrag von Nährstoffen in die Produktive Zone verhindern.
- Im Tiefenwasser steigt aufgrund der stärkeren Sommerschichtung das Risiko des Auftretens anoxischer Bereiche.
- Sowohl höhere Temperaturen als auch anoxische Bedingungen im Tiefenwasser verkleinern den Lebensraum von Fischen.

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

- Robert Schwefel
- +49 30 64181-678
- [robert.schwefel@igb-berlin.de](mailto:robert.schwefel@igb-berlin.de)
- [www.igb-berlin.de](http://www.igb-berlin.de)

