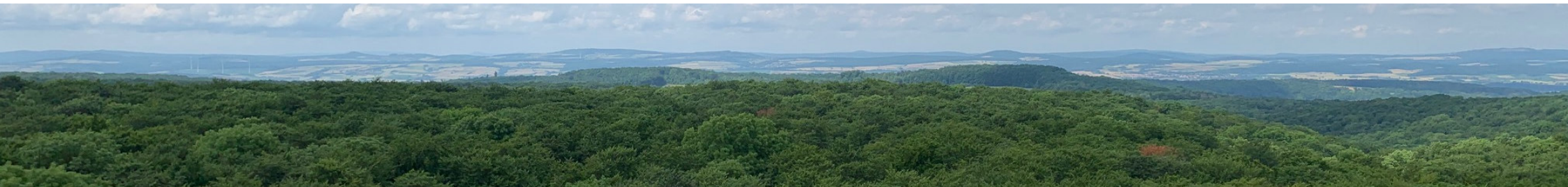


# Zukünftige Herausforderungen für die Waldbewirtschaftung

**Alexander Knohl** und Team der Abt. Bioklimatologie

Christian Ammer, Susanne Bollmus, Holger Miltz, Carola Paul

[aknohl@uni-goettingen.de](mailto:aknohl@uni-goettingen.de)





In der Nähe von Schierke/Harz, 2023  
Quelle: Birgitta Putzenlechner, Uni Göttingen

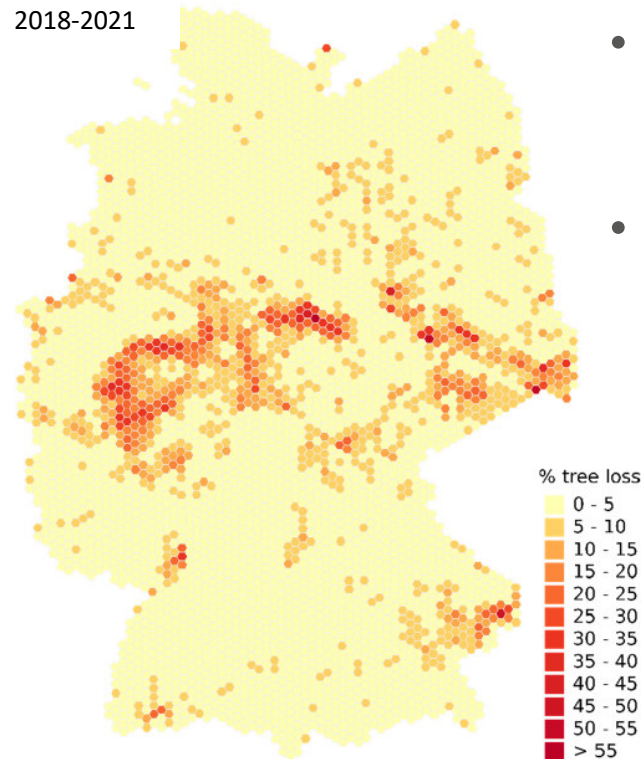


Buchenwälder im Nationalpark Hainich, 2018  
Quelle: Sören Hese, FSU Jena

## Deutschlandweite Waldschäden



2018-2021



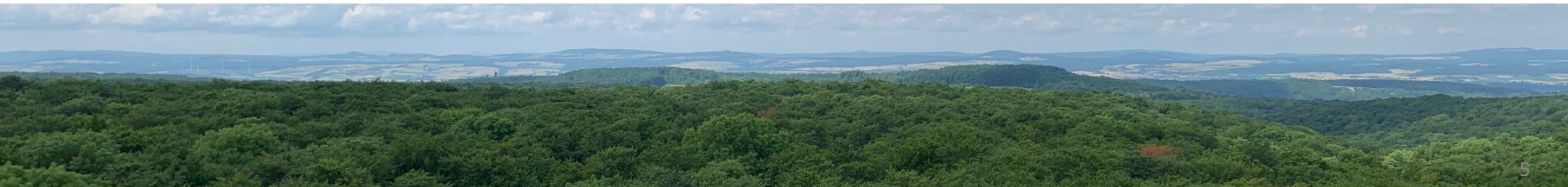
- Von 2018 bis 2021 ca. 500 000 ha Waldverlust
- Entspricht ca. 5 % der Waldfläche in Deutschland

Thonfeld et al. 2022 Remote sensing

# Auswirkung auf CO<sub>2</sub>-Senke des Waldes

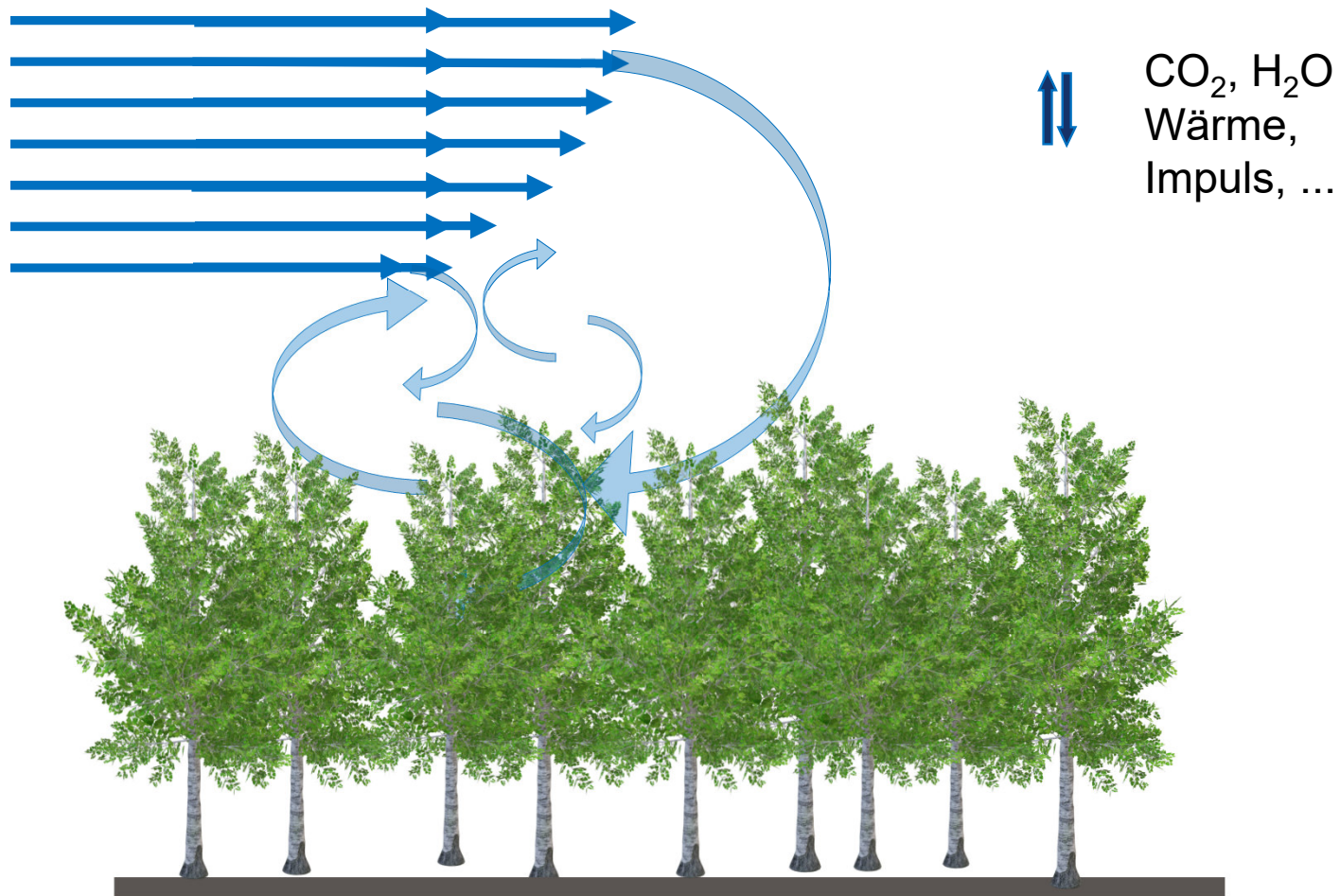
## Mögliche Maßnahmen für Anpassung

## Herausforderungen nach Anpassung

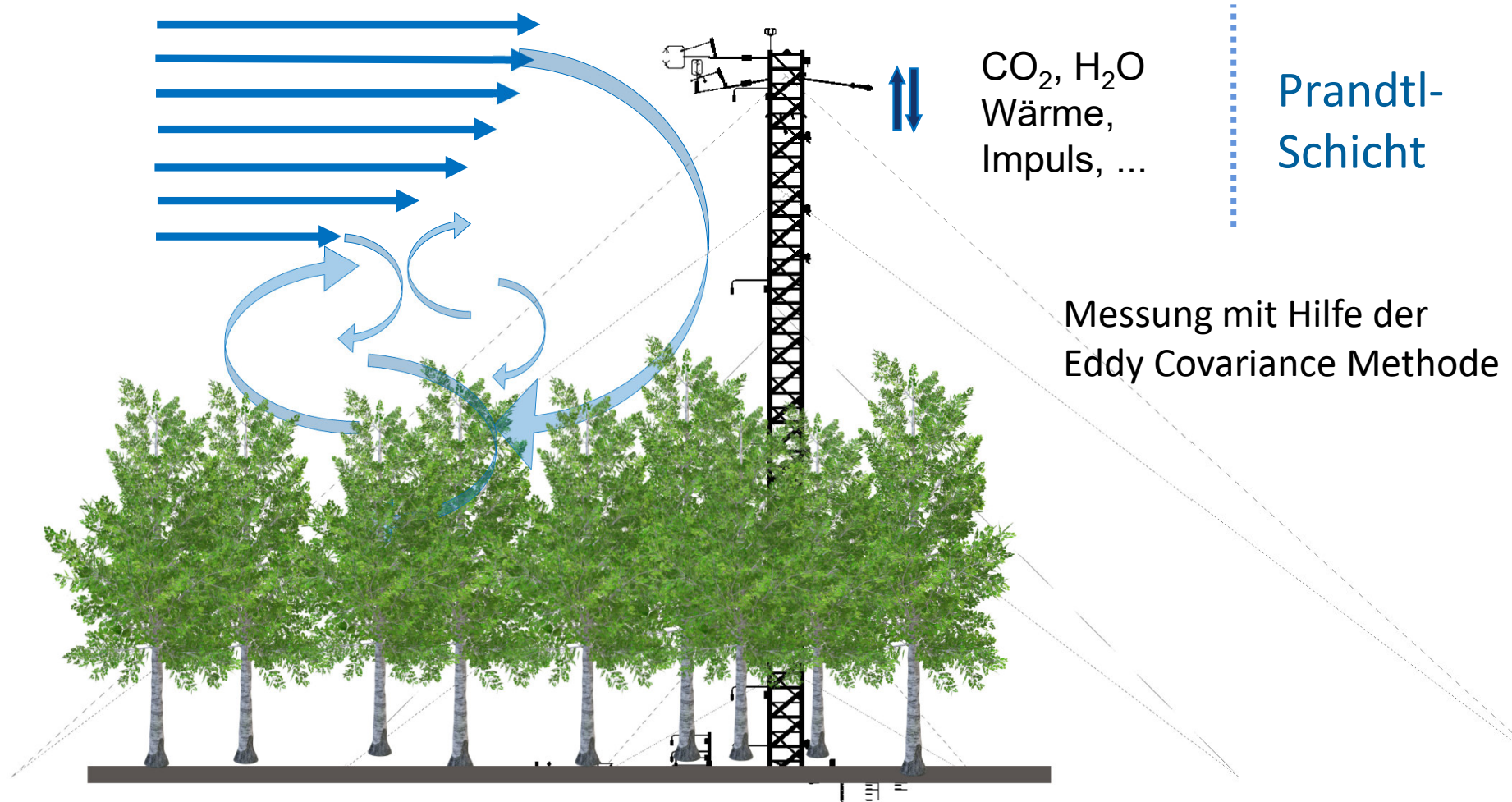




Quelle: Uni Göttingen



Prandtl-  
Schicht



# Kohlenstoff-Austausch eines Waldes

- kontinuierliche Messungen  
seit Herbst 1999
- Teil des European  
Integrated Carbon  
Observation Systems (ICOS)  
und des globalen Fluxnet



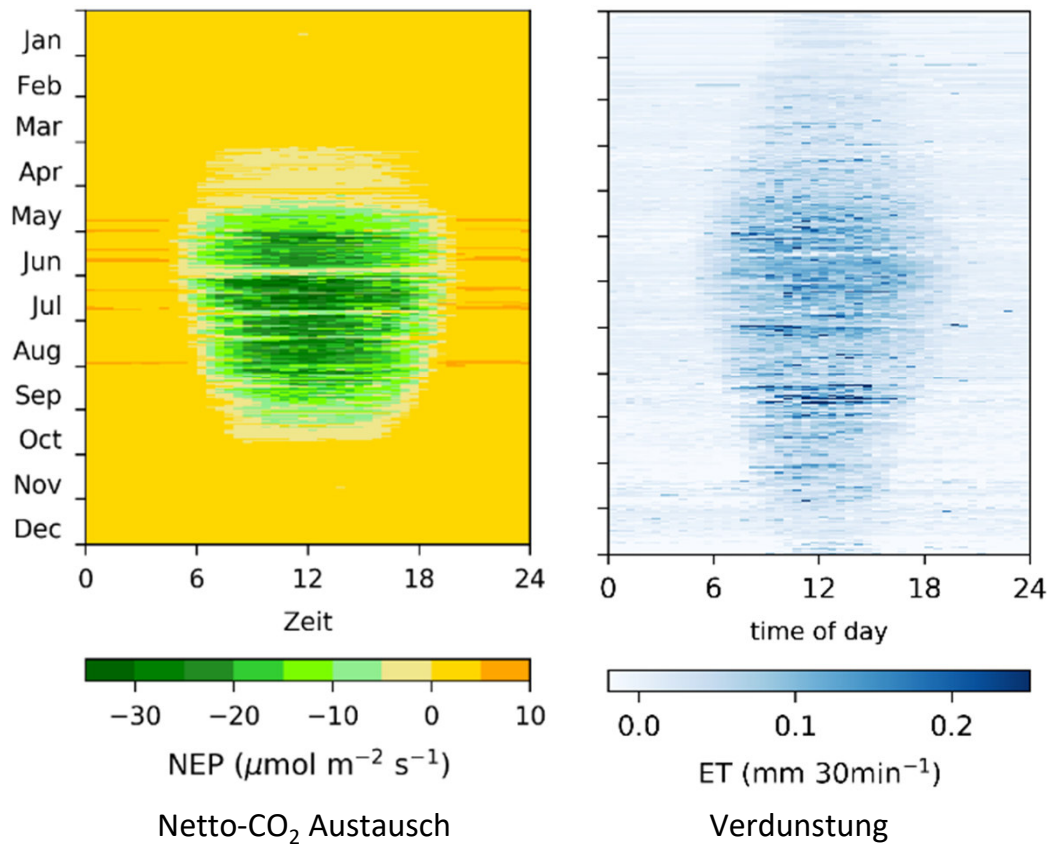
Quelle: Marlin Müller, DLR Jena, 2023

- Globales Monitoring System
- Global ca. 1000 Fluxnet Standorte
- Daten frei verfügbar



Quelle: Burba 2019, DOI: 10.13140/RG.2.2.33191.70561

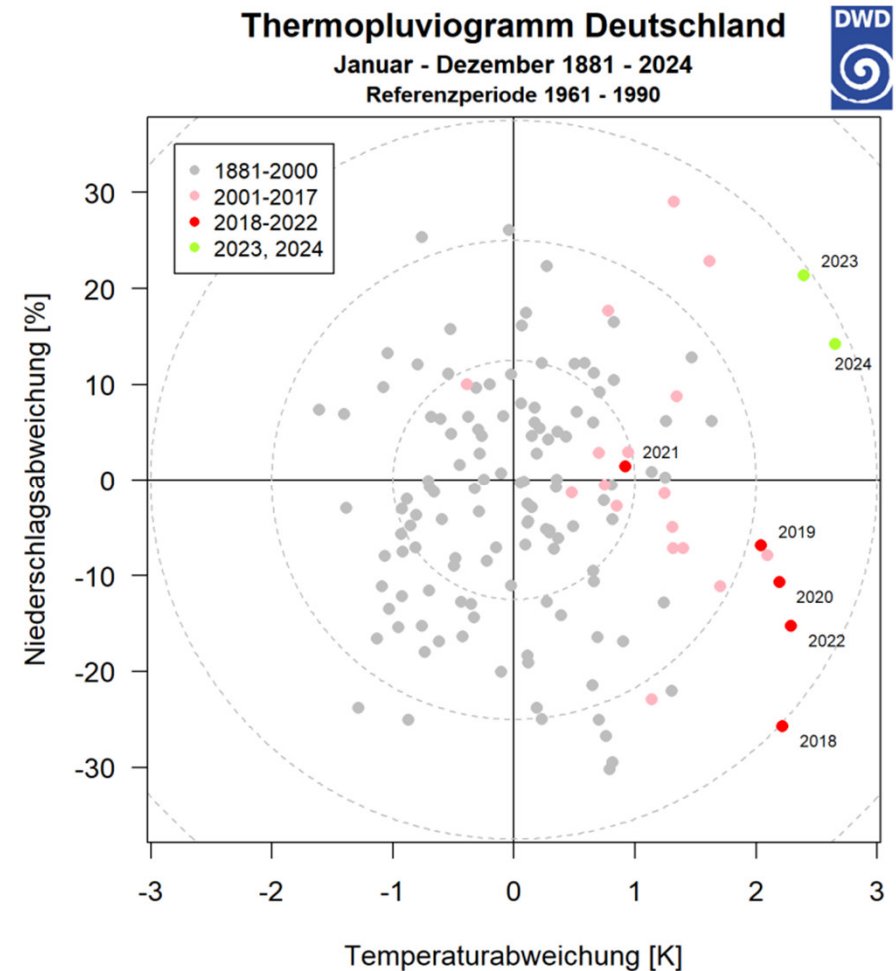
## CO<sub>2</sub>- und Wasserflüsse



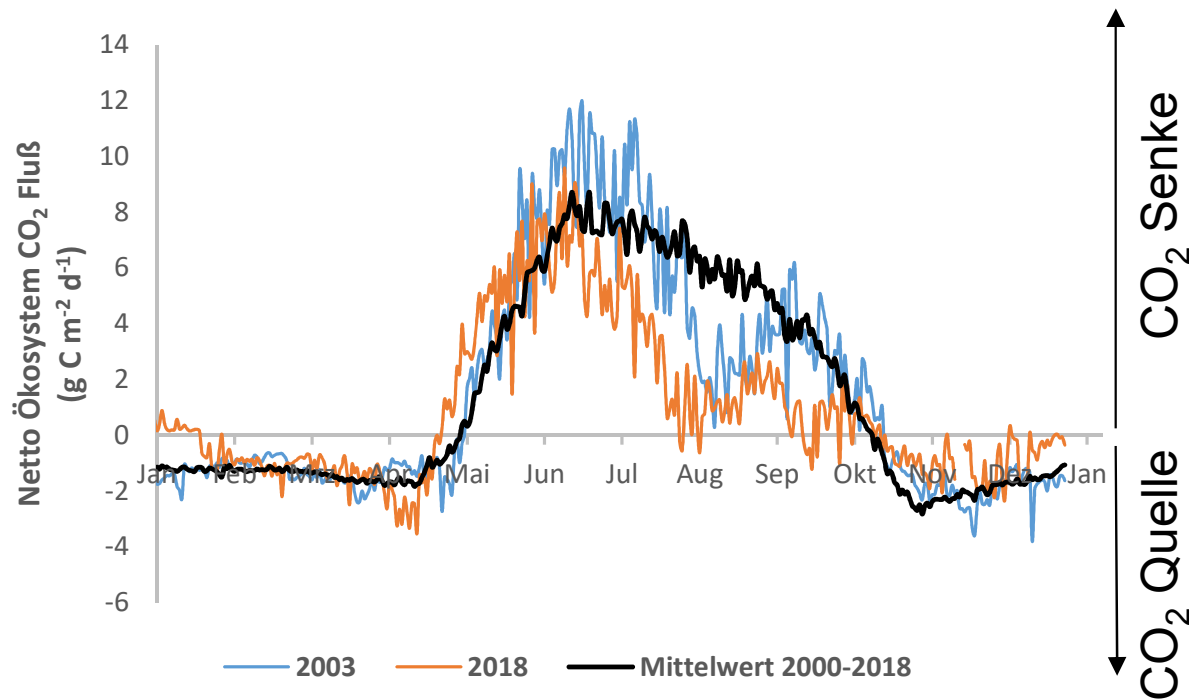
- Kontinuierliche Messung des “Atem des Waldes”
- Starker Tages- und Jahresgang der CO<sub>2</sub>- (NEP) und Wasser- (ET) Flüsse
- Relativ stabil von 2000 bis 2017

Klosterhalften et al. unpubl.

- Abweichung von Temperatur und Niederschlag gegenüber 1961-1990
- 2018, 2019, 2020, und 2022 liegen alle im warmen und trockenen Bereich
- 2023 und 2024 warm und feucht



# Auswirkung von Trockenheit auf CO<sub>2</sub> - Flüsse



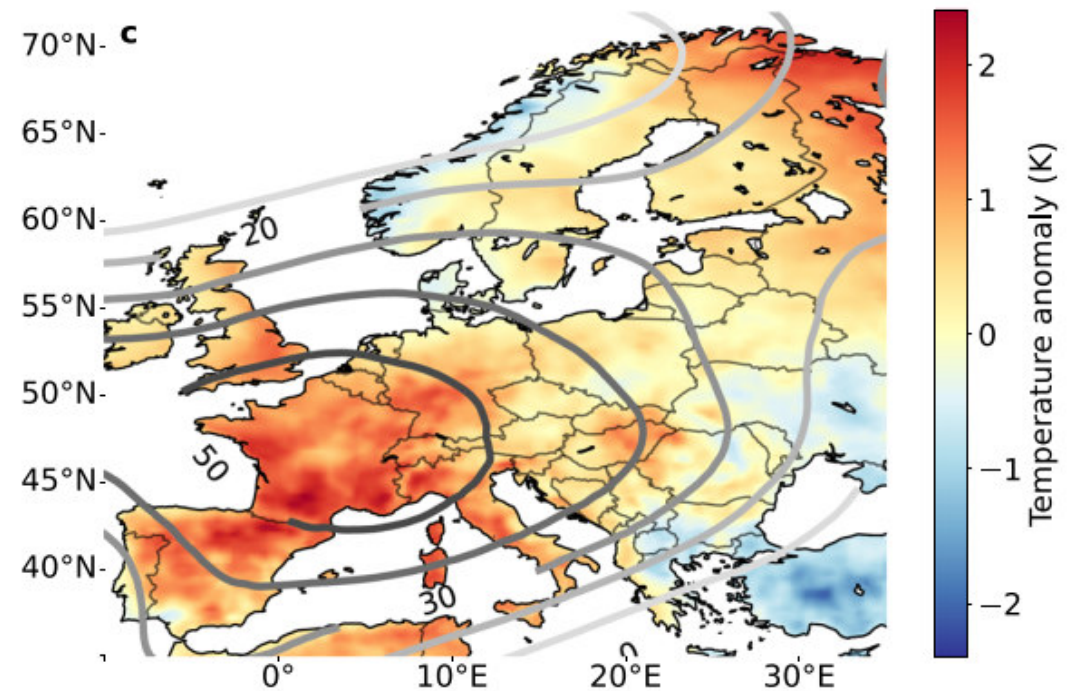
- Jahressumme 2003  
nahe am langjährigen  
Mittel (+3%)
- Jahressumme 2018  
-27% gegenüber  
langjährigem Mittel

Klosterhalften et al. unpubl.

## Europäische Ebene

- Ca. 60 Mio. Tonnen weniger CO<sub>2</sub> Aufnahme im Sommer als normal in von der Trockenheit betroffener Region
- Einige Wälder in Frankreich wurden zur CO<sub>2</sub> Quelle

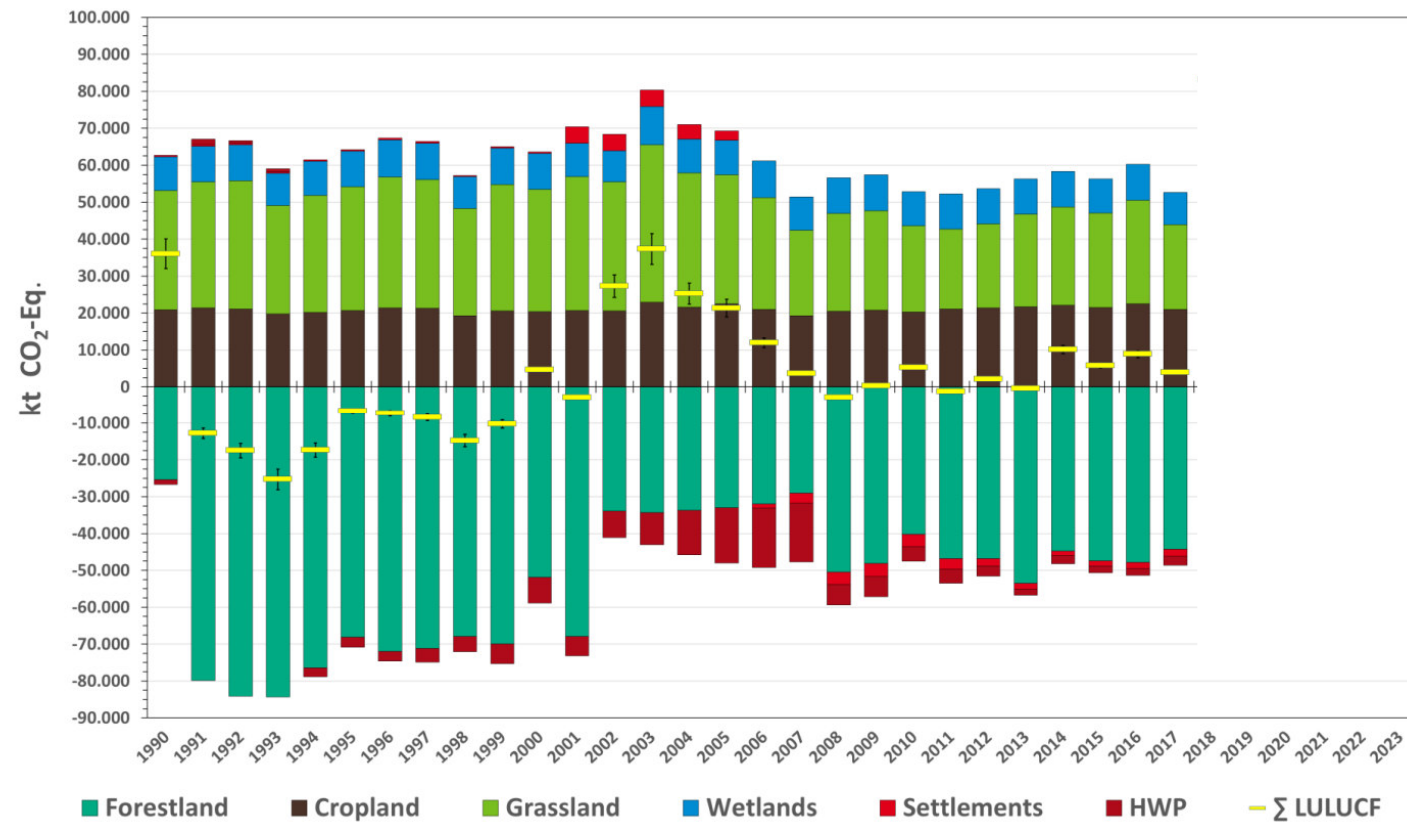
## Temperatur-Extrem im Sommer 2022



Quelle: Van der Waude et al. 2023 Nature Communications

## Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar

- Wälder in D nahmen ca. 9 - 14% der anthropogenen Emissionen aufgenommen.
- 2018 hat laut Inventur Wald von Senke zu Quelle werden lassen.



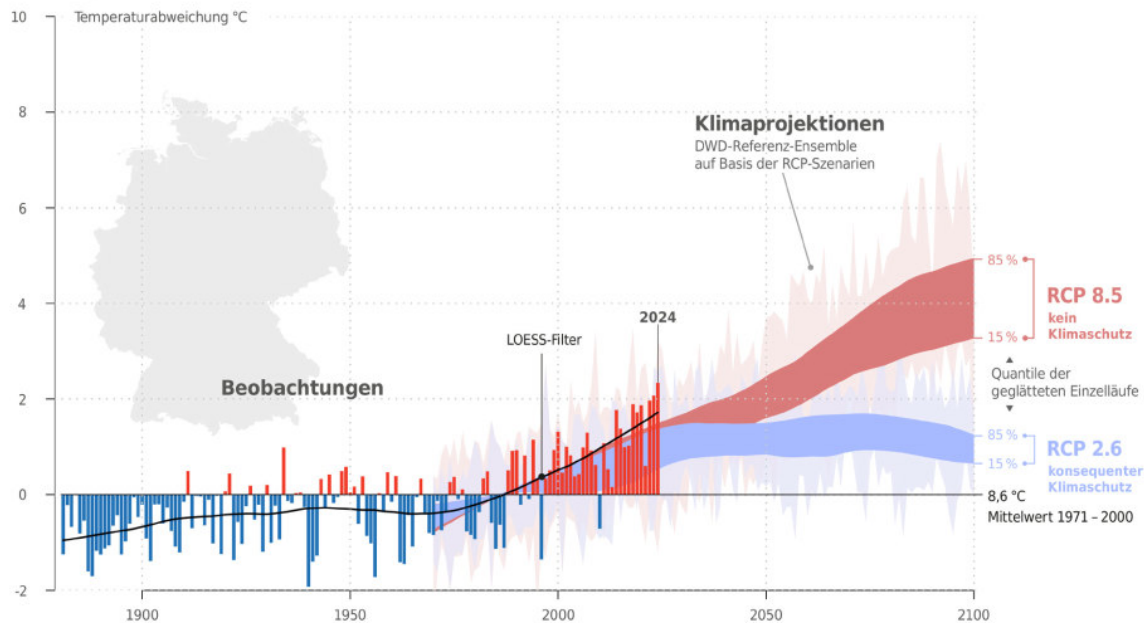
Quelle: Thünen Institut, 2025

# Projektionen für Temperaturen in Deutschland

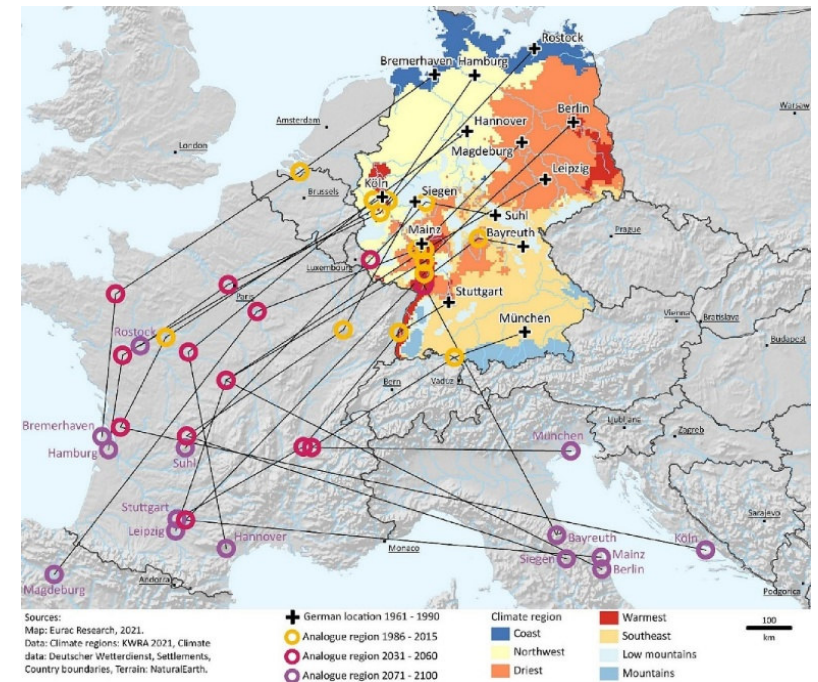
## Deutschland im Klimawandel

Abgebildet sind die **positiven** und **negativen** Abweichungen der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1971 – 2000 sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100

Deutscher Wetterdienst  
Wetter und Klima aus einer Hand



## Klima-Analoge: welches Klima heute, wird unserem Klima in der Zukunft

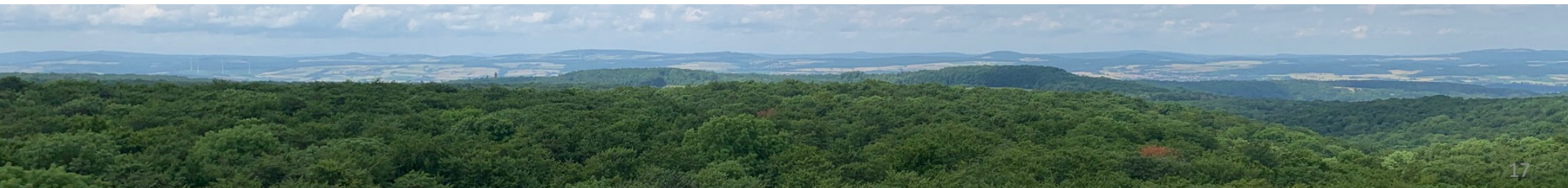


Crespi et al. 2023

# Auswirkung auf CO<sub>2</sub>-Senke des Waldes

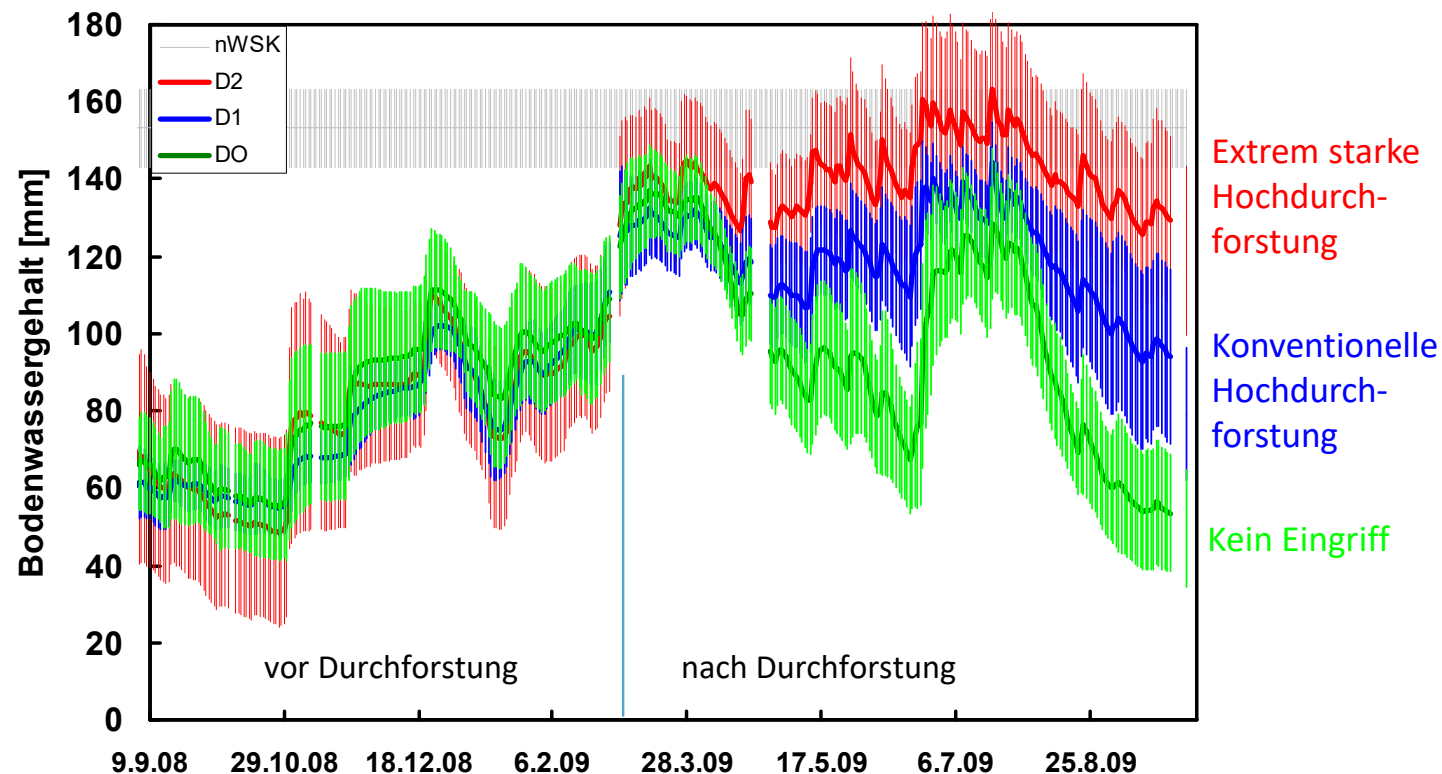
## **Mögliche Maßnahmen für Anpassung**

### Herausforderungen nach Anpassung



# 1) Reduzierung der Bestandesdichte

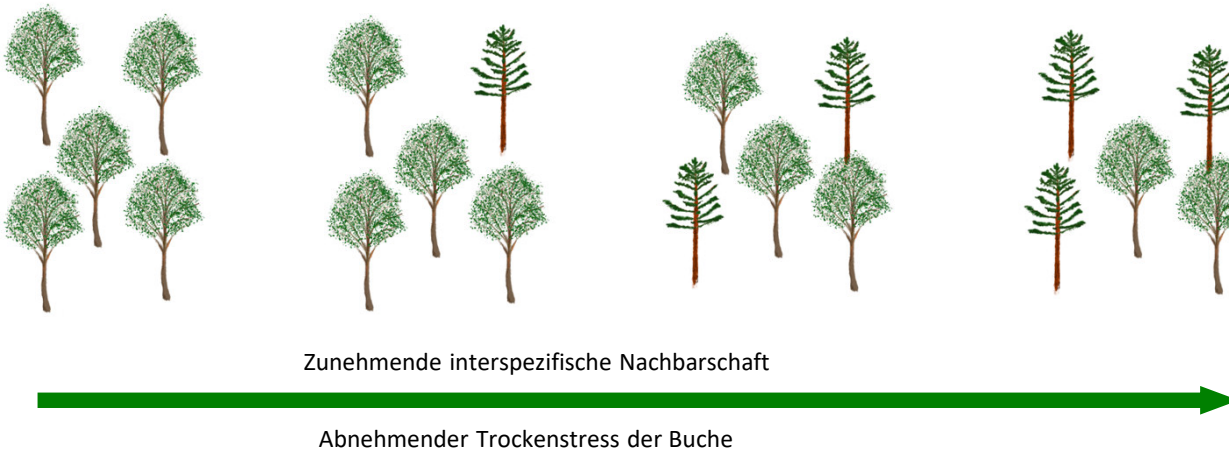
- Nach starker (D2) und mittlerer (D1) Durchforstung höhere Bodenfeuchtigkeit als ohne Durchforstung aufgrund reduzierter Evapotranspiration
- Effekt schwächt sich aber in den folgenden Jahren stark ab.



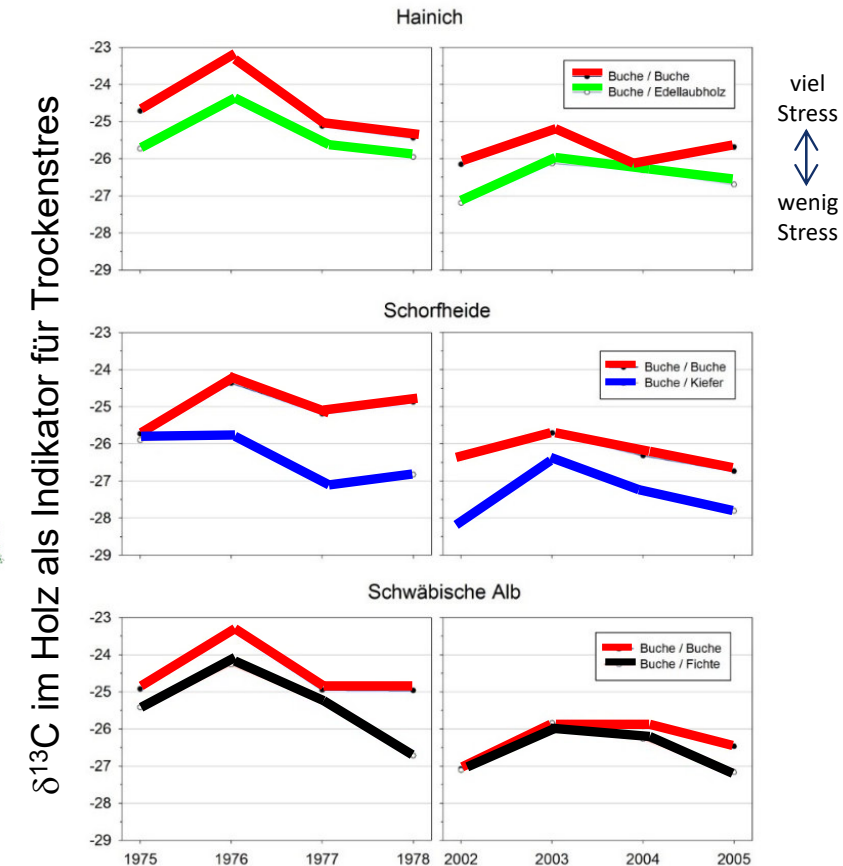
Quelle: Arbeitsgruppe Ammer, Abt. Waldbau, siehe auch Gebharts et al. AgForMet 2014

## 2) Mischung von Baumarten im Bestand

**Baumartenmischungen mit komplementären Eigenschaften**  
Beispiel: Buche/Douglasie



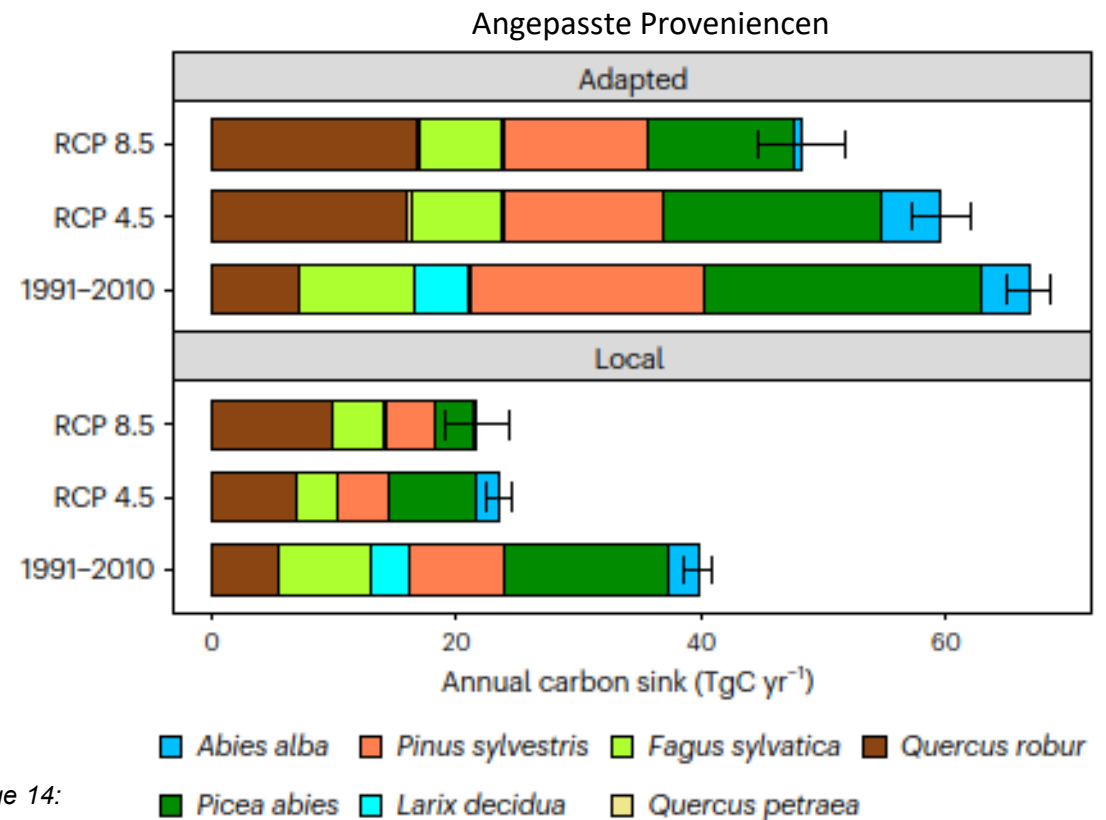
*Hackmann et al. (2024) Tree Physiology 44: tpae114*



Quelle: Arbeitsgruppe Ammer, Abt. Waldbau, Metz et al. GCB 2016

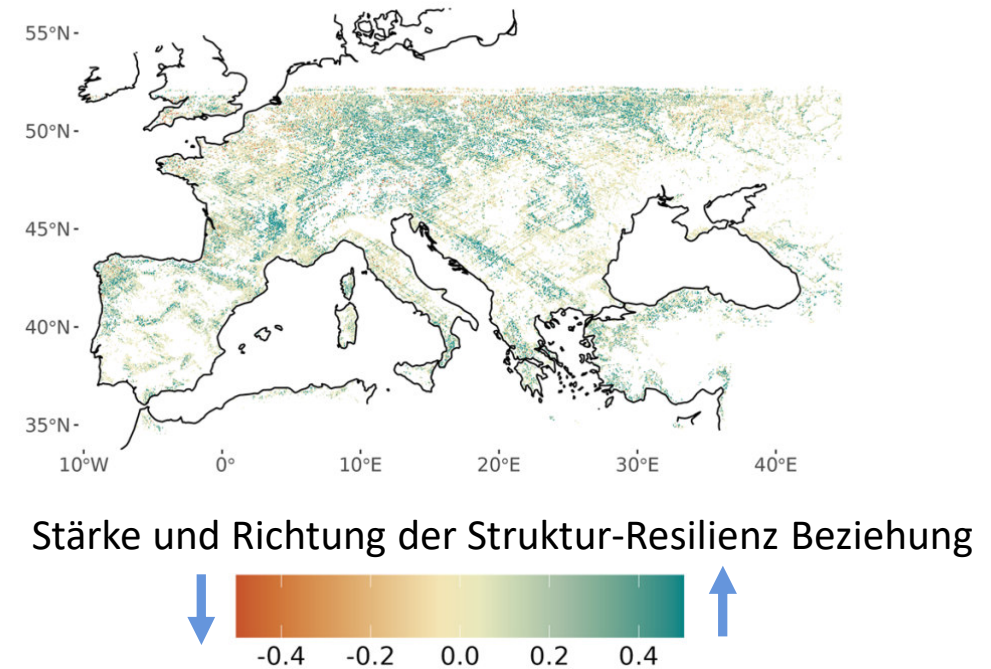
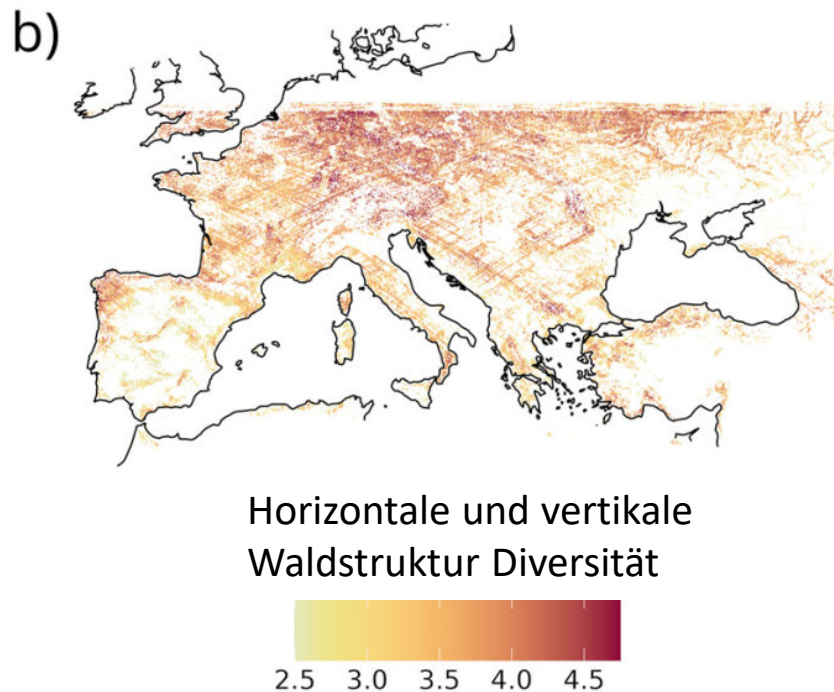
### 3) Unterstützte Migration („Assisted migration“)

- Transfer von Herkünften innerhalb der Verbreitung (z.B. Buche aus südlicher Herkunft)
- Ausweitung der Verbreitung (z.B. Flaumeiche nach Norddeutschland)
- Einführung neuer Arten (z.B. Libanon-Zeder)



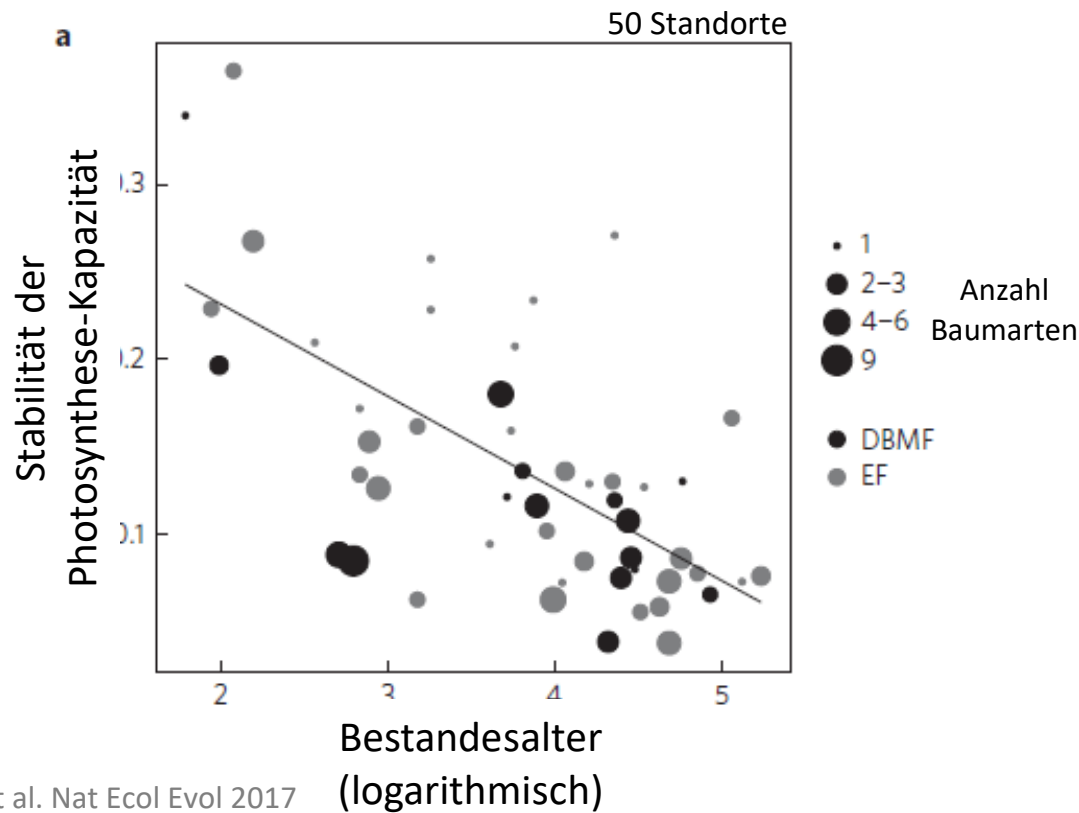
Chakraborty et al. (2025) *Nature Climate Change* 14: 845-852

## 4) Diversität in Waldstruktur erhöht Resilienz der Wälder



Quelle: Pickering et al. Nat. Com. 2025

## Alte und artenreiche Wälder sind stabiler



Quelle: Musavi et al. Nat Ecol Evol 2017

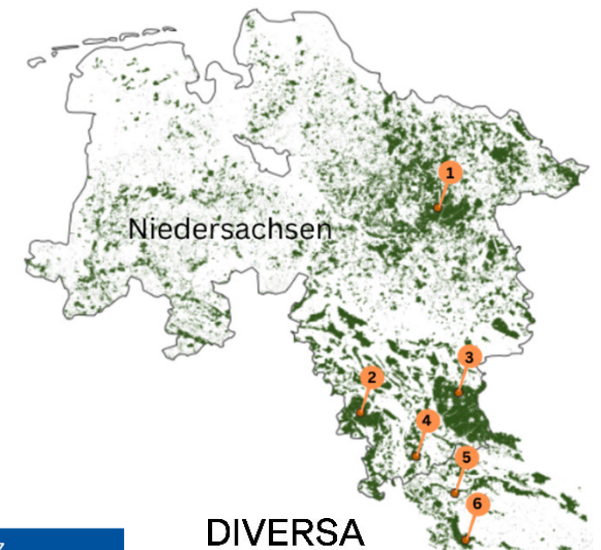
- Bestandesalter und Baumartenzahl dämpft inter-annuelle Variation der Photosynthese-Kapazität

# FoResLab

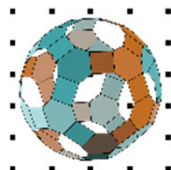
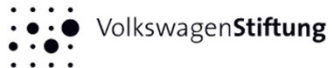
## Future Lab towards Forests Resilient to Climate Change

### Zentrale Frage

Wie können wir Wälder resilienter gegen Klimaveränderungen unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen machen?



zukunft.  
niedersachsen



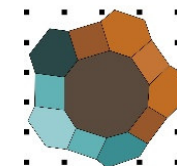
**ZKf**  
N  
Zentrum  
Klimaforschung  
Niedersachsen



LUXEMBOURG  
INSTITUTE OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY



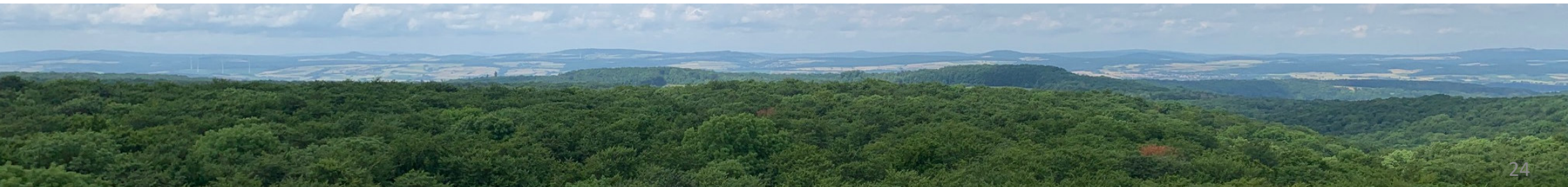
DIVERSA



# Auswirkung auf CO<sub>2</sub>-Senke des Waldes

## Mögliche Maßnahmen für Anpassung

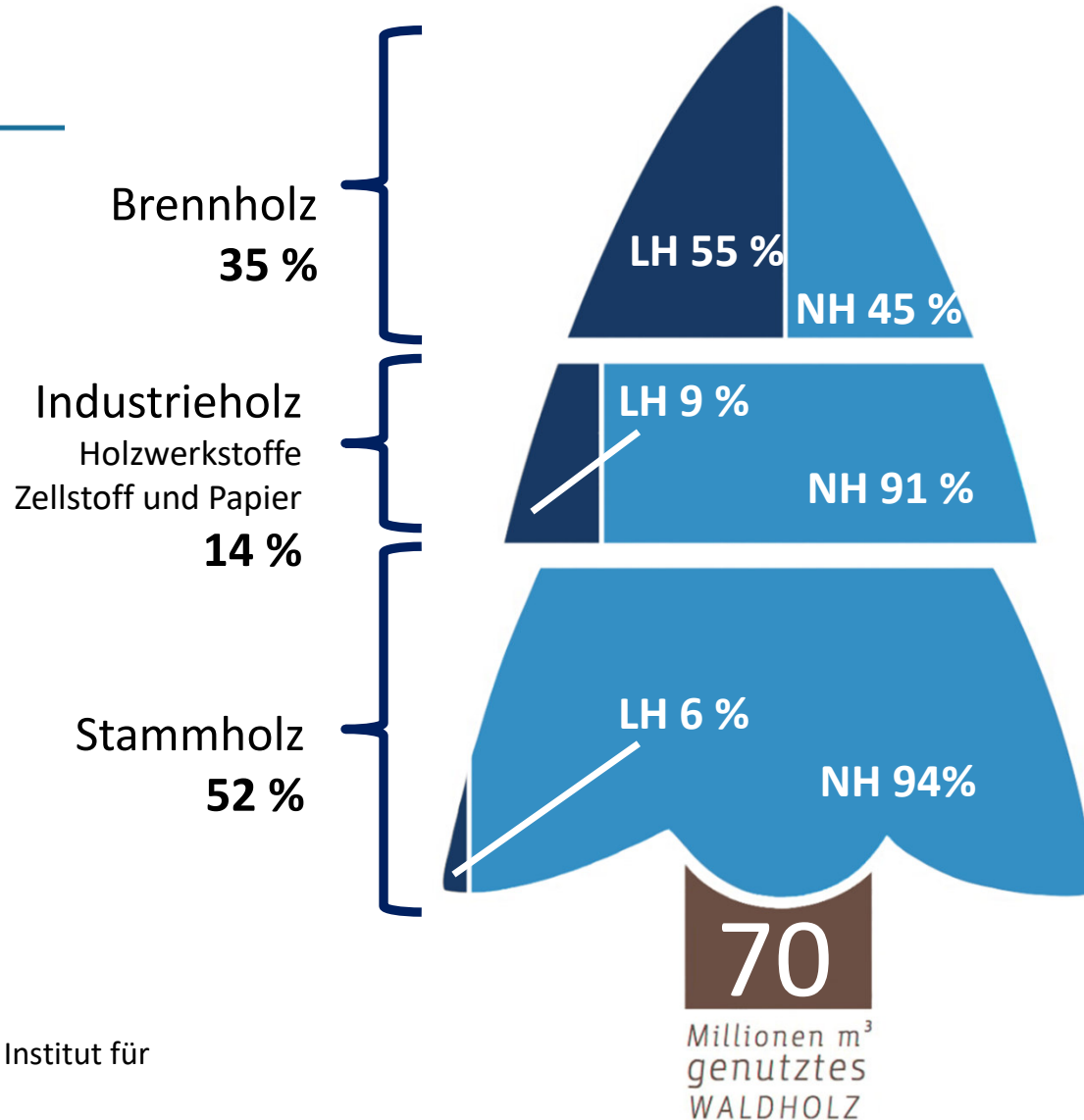
## Herausforderungen nach Anpassung



# Verwendung von Holz in Deutschland

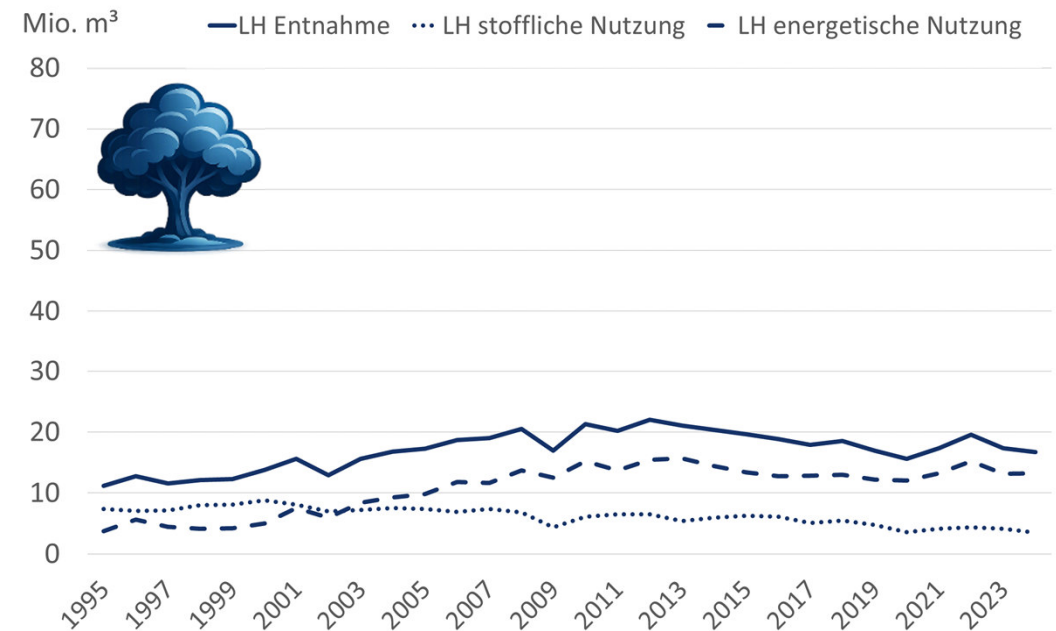
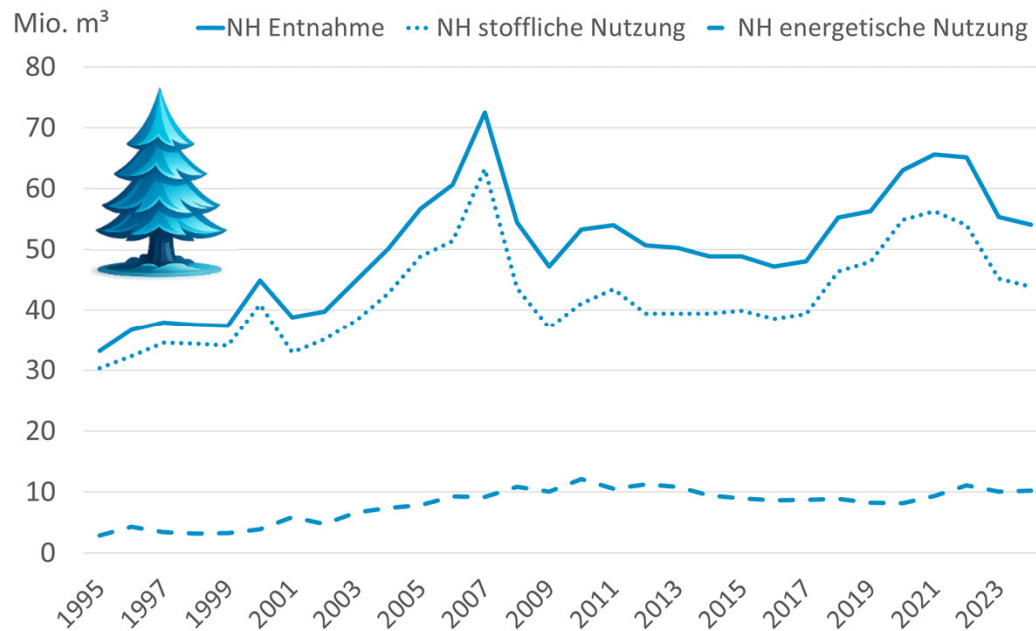
## Entnommenes Rohholz 2024

Gesamt: ca. 70 Mio. m<sup>3</sup> → 100 %



Quelle: Abbildung geändert nach DHWR 2025, Zahlen geändert nach: Thünen Institut für  
Waldwirtschaft Inlandsverwendung Rohholz 2025

# Entnahme sowie stoffliche und energetische Nutzung (1995-2024)

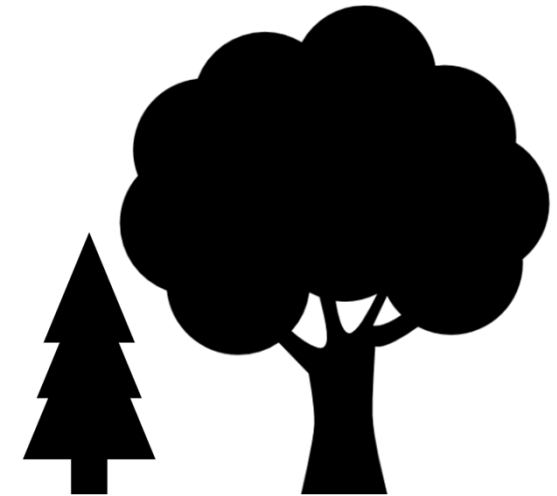


Abbildungen erstellt auf Grundlage der Daten: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>

# Der Zukunftswald wird deutlich mehr Laubholz haben!

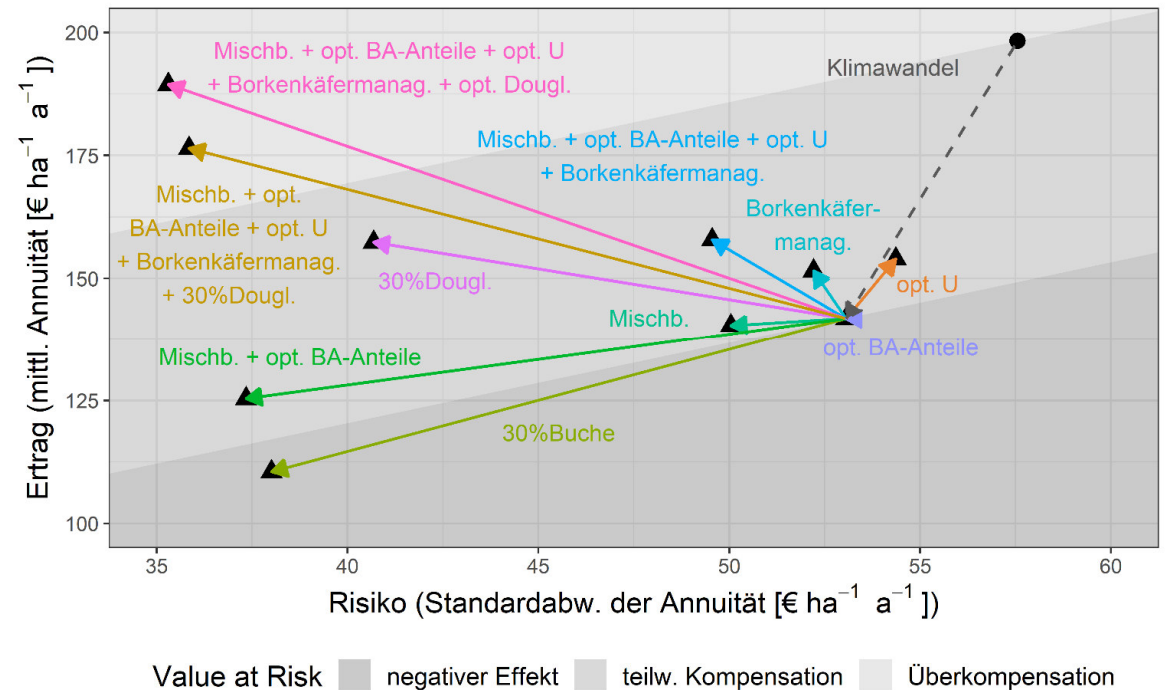
- Momentan ist eine hochwertige Nutzung des Laubholzes weitaus zu gering!
- Ist mehr Laubholz technologisch nutzbar?
  - Basiseigenschaften wie Rohdichte (Buche > Fichte)?
  - Stammholz (Stammform)?
  - Verfügbarkeit (Zuwachsraten Buche < Fichte)?

Zukünftige Waldgeneration



# Analyse (ökonomischer) Anpassungsstrategien unter hoher Unsicherheit

- **Baumartendiversifikation** zum Abpuffern von Risiken
- **Synergien zwischen Maßnahmenbündeln:** nicht nur Mischung von Baumarten sondern Mischung von Maßnahmen!
- **Einbeziehung produktiver Baumarten** =zentrale ökonomische Anpassungsstrategie



Fuchs et al. Forestry (2021), Fuchs et al. (2023) AFZ der WALD

## Zusammenfassung

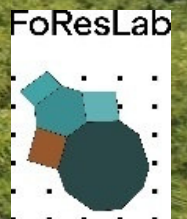
- Wälder in ihrer aktuellen Form sind starken Risiken ausgesetzt und müssen sich an den Klimawandel anpassen. Ihre Fähigkeit als CO<sub>2</sub> Senke ist bedroht.
- Mögliche Maßnahmen umfassen Erhöhung der Arten- und Strukturvielfalt und Assistierte Migration.
- Diese Maßnahmen führen aber zu Herausforderungen in der ökonomischen Nutzung und der Verwendbarkeit des Holzes.

# Herzlichen Dank an das Team der Bioklimatologie und von FoResLab



GEFÖRDERT VON

**zukunft.niedersachsen**



# Wie blicken Forstbetriebe in die Zukunft?

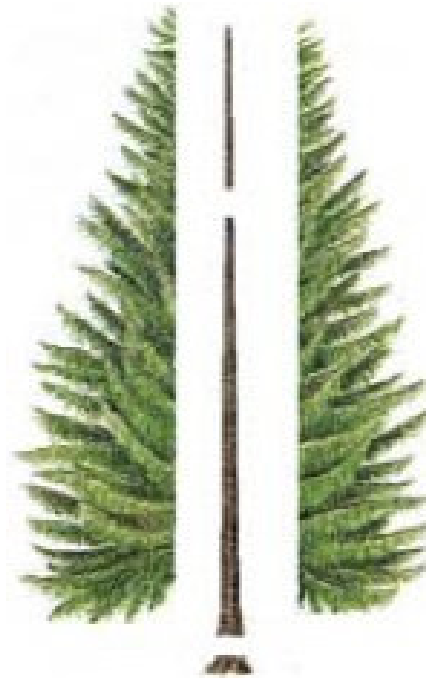
## Forstbetriebliche Anpassungsstrategien



## Einfluß Stammformen auf Ausbeute



Foto: Ronan Furuta auf unsplash



≈ 60-80%

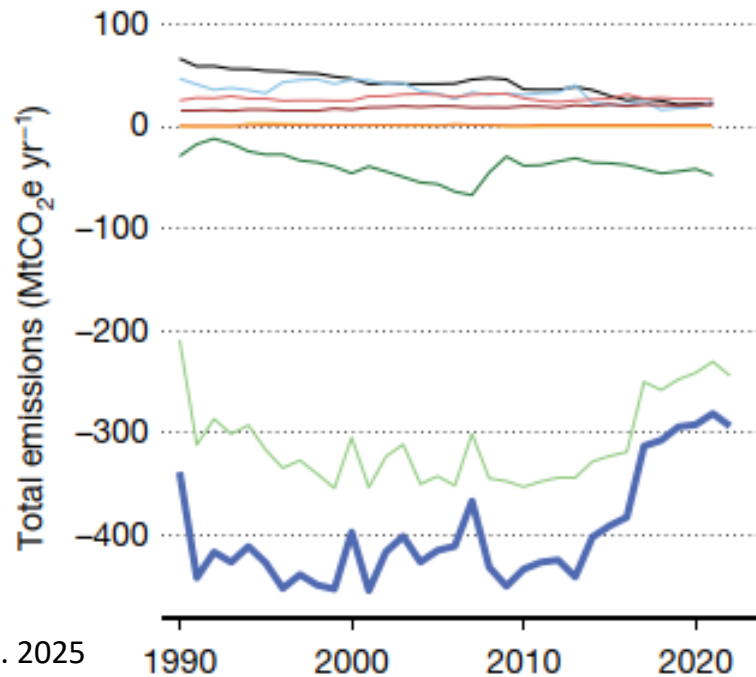


≈ 25%

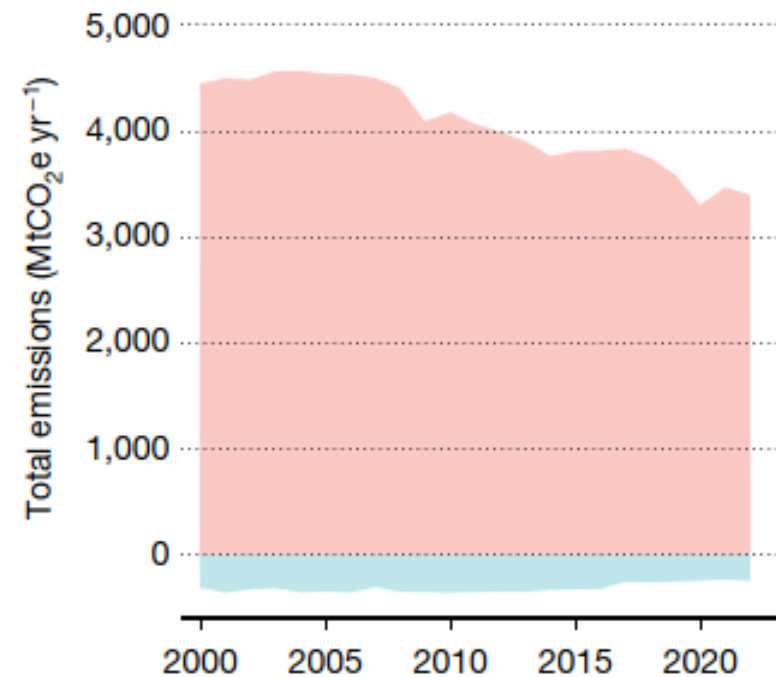
Vergleich Stammholzanteile Laub- und Nadelholz (verändert nach Möhring, B. 2015)

# Beitrag der europäischen Wälder zum Klimaziel

**a** — Cropland — Other land — HWP  
 — Grassland — Wetlands — Other  
 — LULUCF — Forest land — Settlements



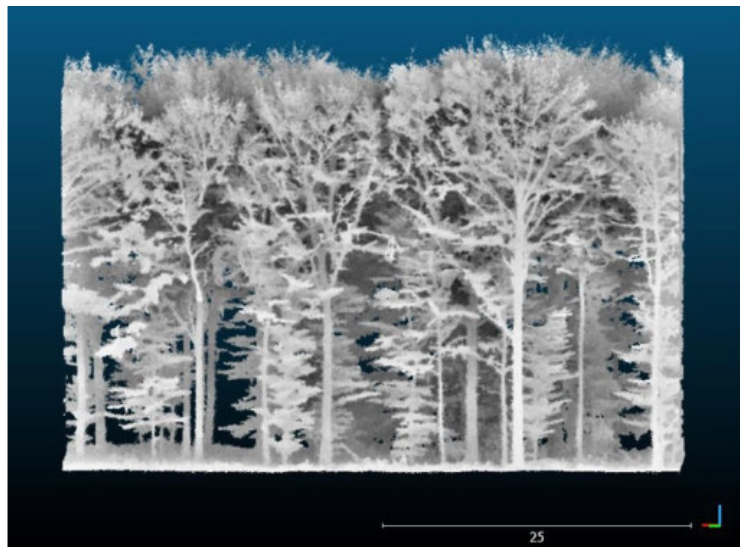
**b** — Total gross emissions  
 — LULUCF



Quelle: Migliavacca et al. 2025

## Frage 3: Anpassung der Wälder – aktiv oder passiv?

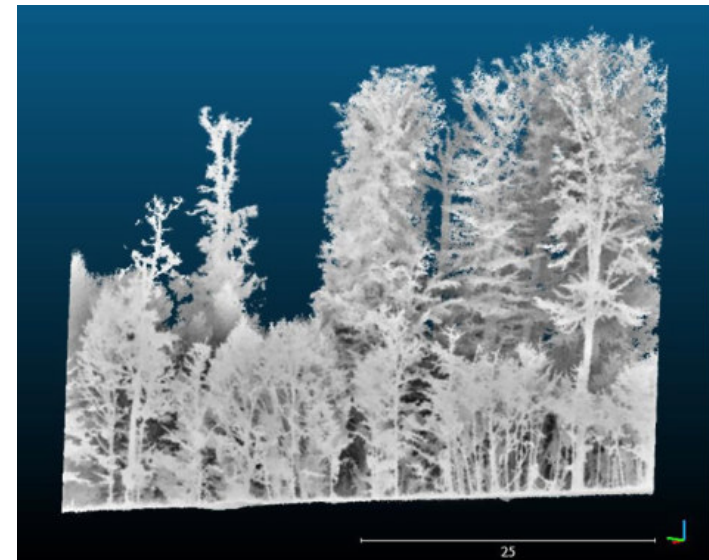
Ungeschädigt



Verjüngung >1m:  
3359/ha ( $\pm 2204$ ), 70 % Buche

Buche folgt Buche!

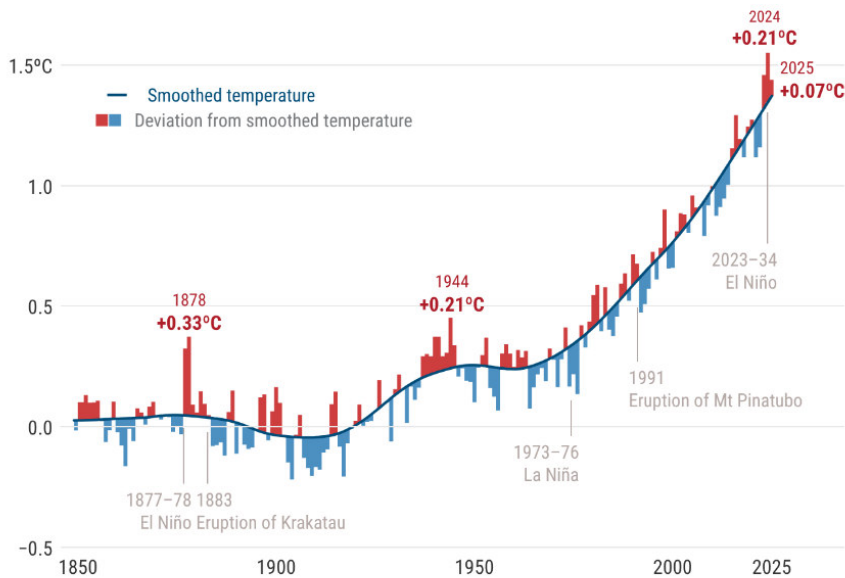
Stark geschädigt



Verjüngung >1m:  
9271/ha ( $\pm 3704$ ), 86 % Buche

*Höwler et al. (2024) Trees, Forests and People 15: 100506*

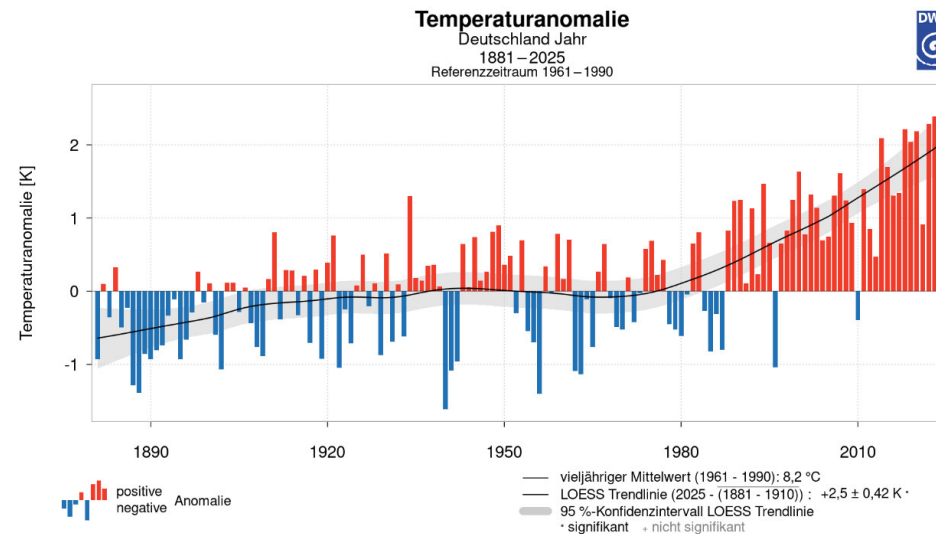
# Globale und lokale Temperaturerhöhung



Only a sample of some of the most important natural events are highlighted.

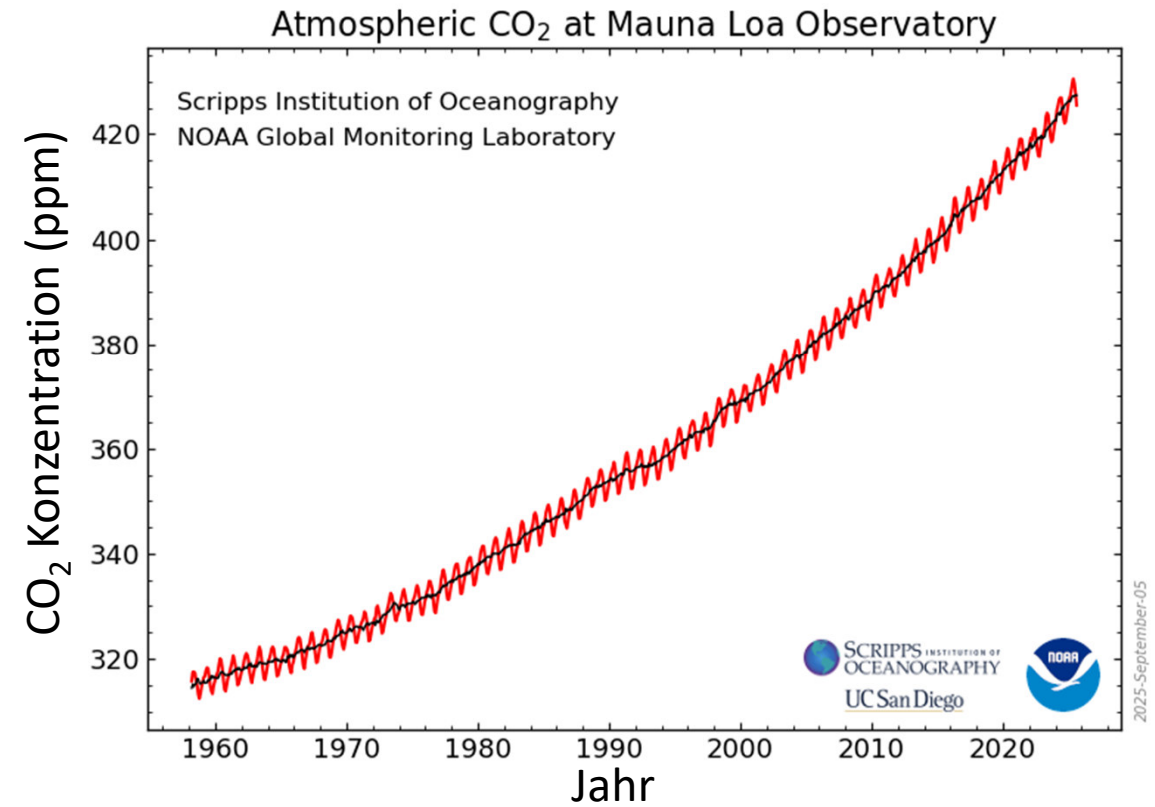
Data: average of Berkeley Earth, ERA5, GISTEMPv4, HadCRUT5, JRA-3Q, NOAA GlobalTempv6 • Reference period: pre-industrial (1850-1900) • Credit: C3S/ECMWF

- 2024 war das erste Jahr, in dem global das 1.5°C Ziel überschritten wurde.
- Erwärmungstrend in Deutschland (1.9°C) stärker als global (1.2°C)



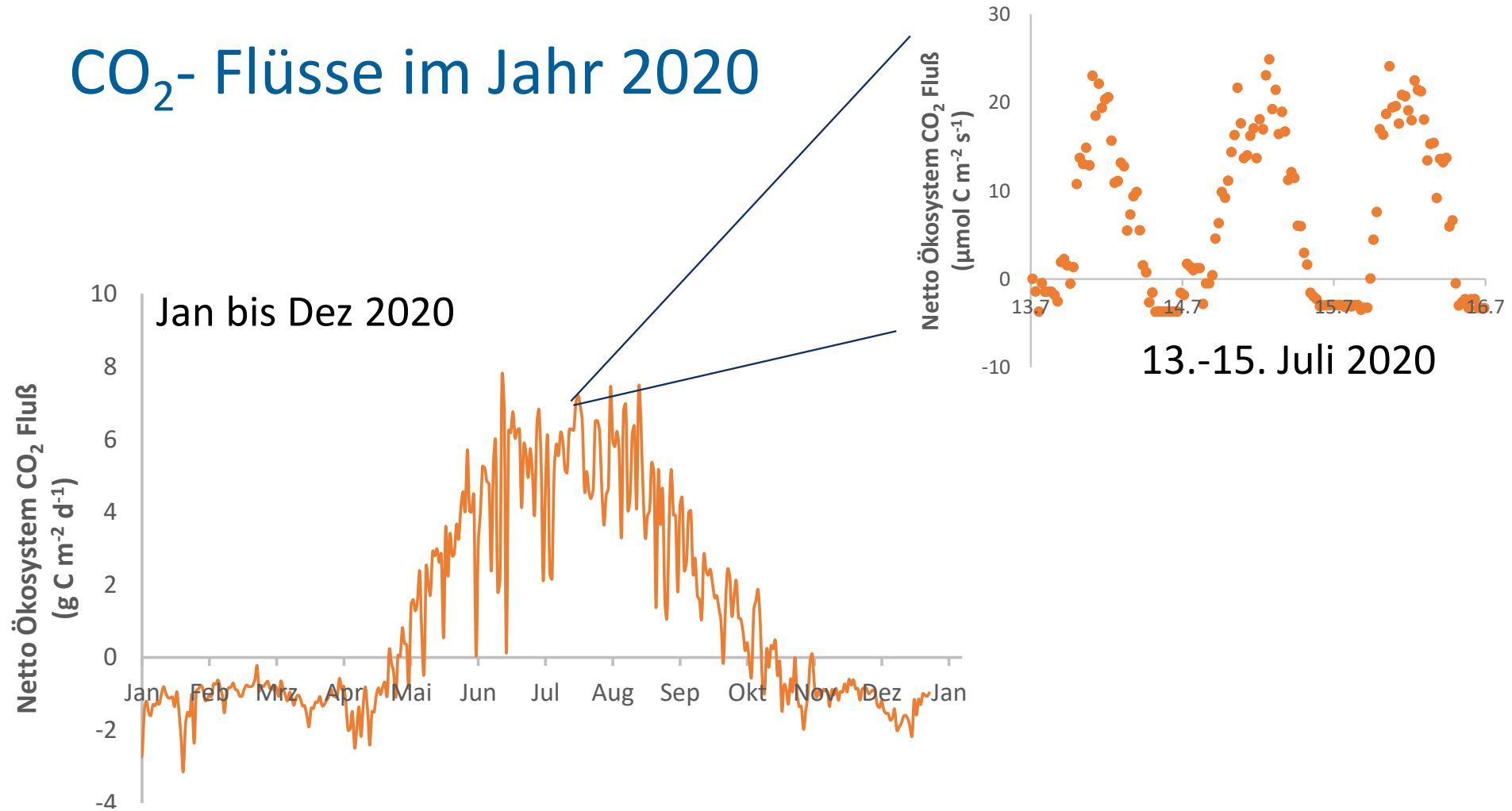


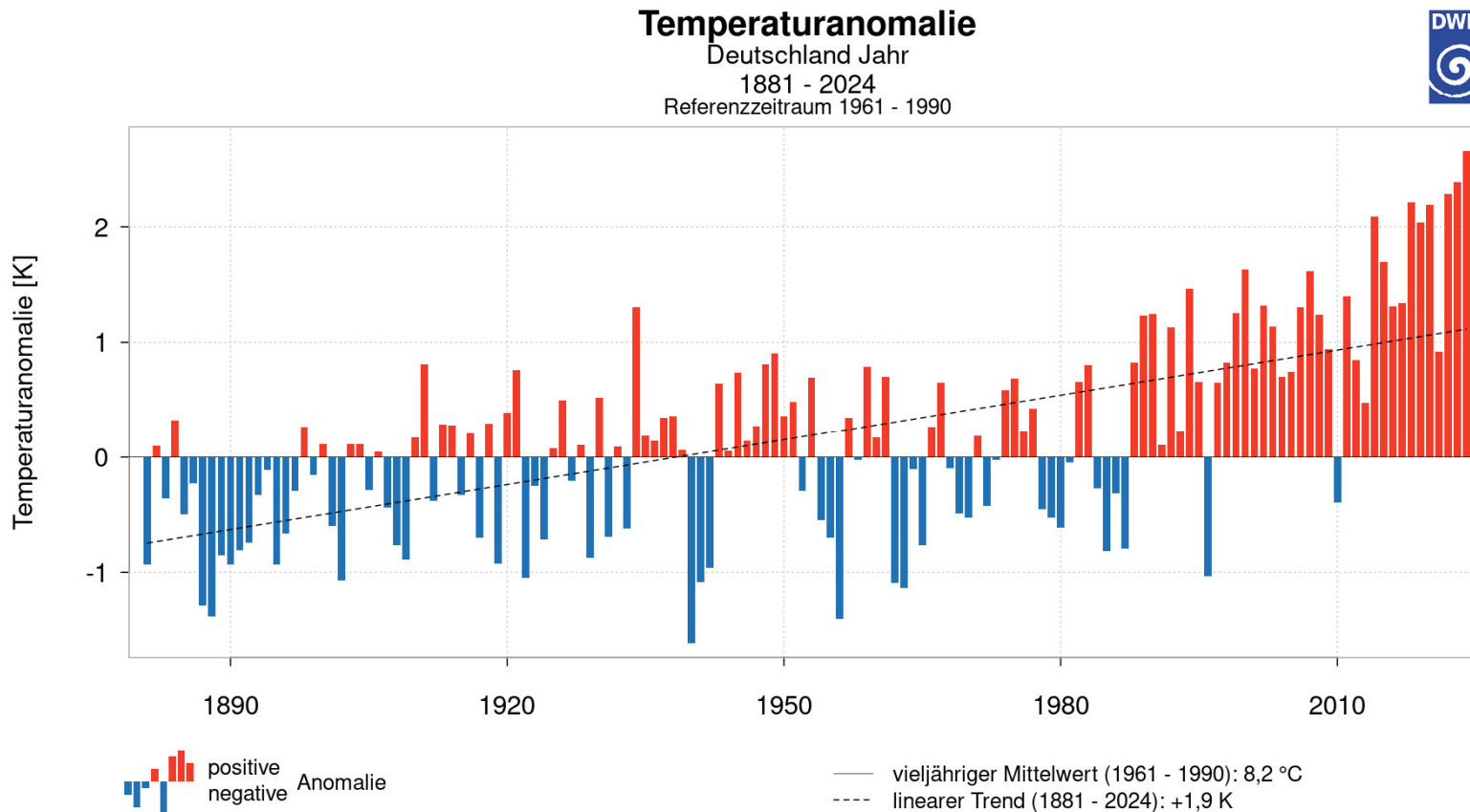
Quelle: Wikipedia (The blue marble, NASA)



Quelle: <https://gml.noaa.gov/>

# CO<sub>2</sub>- Flüsse im Jahr 2020

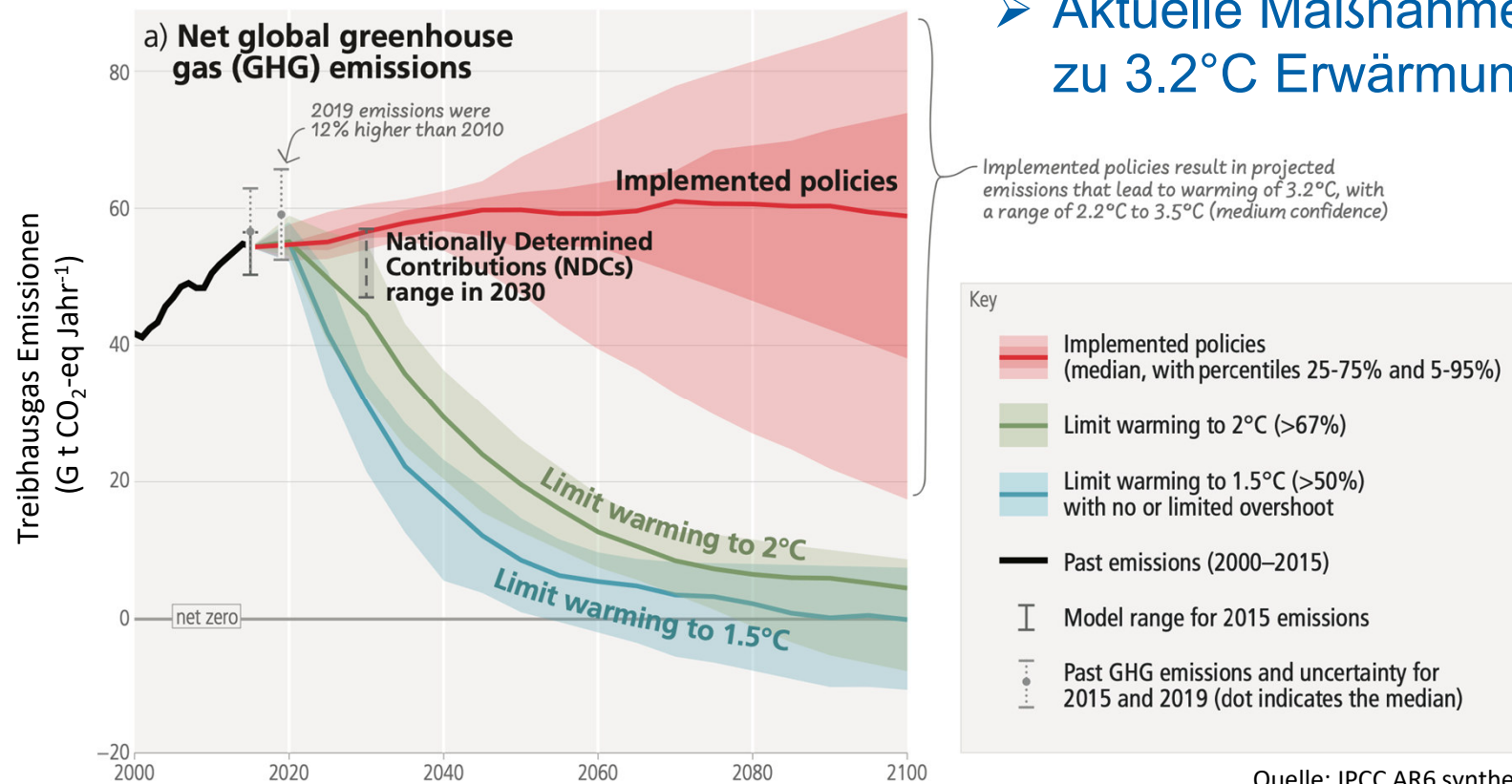




- 2024 war das erste Jahr, in dem global das 1.5°C Ziel überschritten wurde.
- Erwärmungstrend in Deutschland (1.9°C) stärker als global (1.2°C)

Quelle: <https://www.dwd.de/zeitreihen/>, 2025

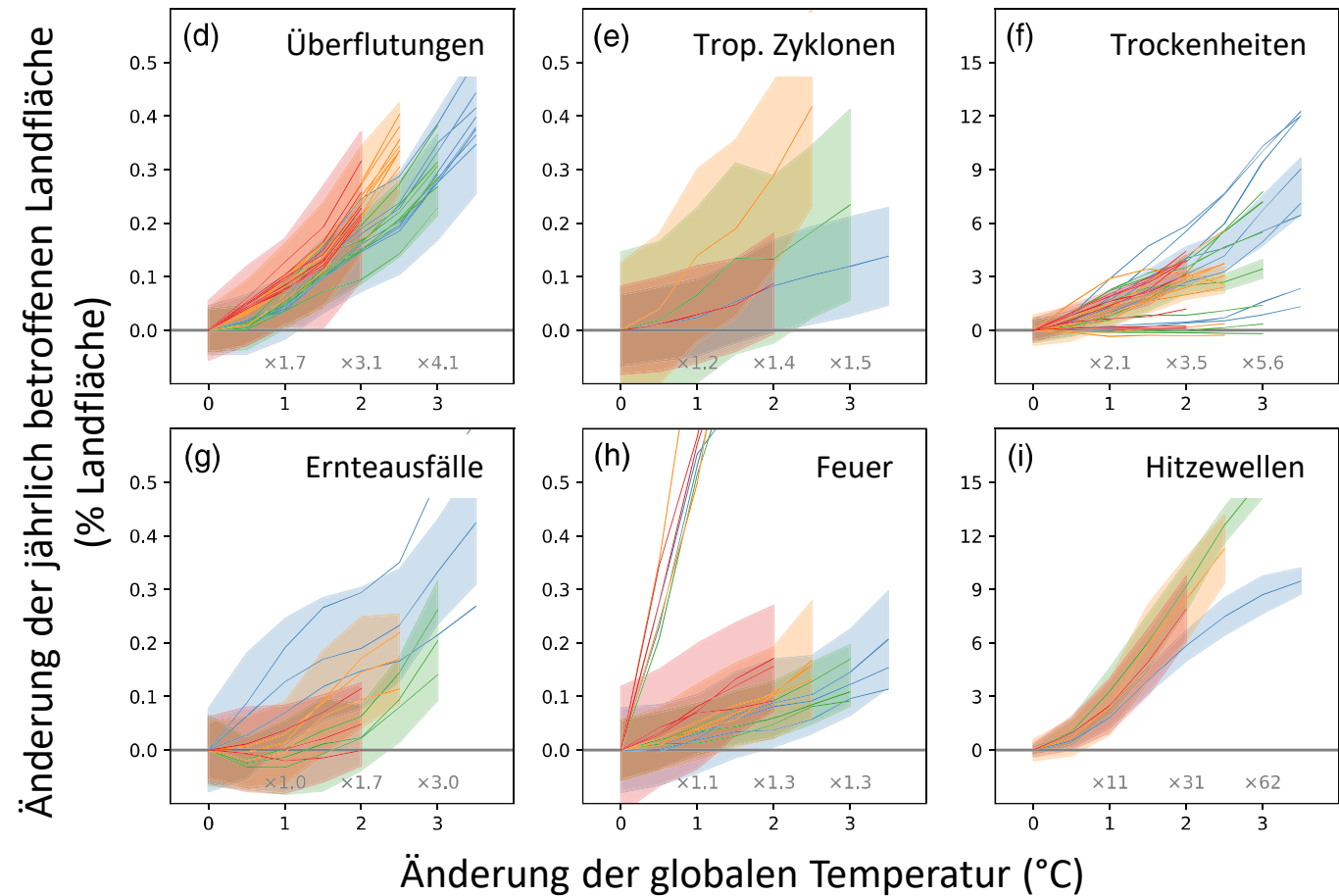
# Was erwartet uns in Zukunft?



➤ Aktuelle Maßnahmen führen zu 3.2°C Erwärmung.

## Zunahme von Extremereignissen bei steigender Temperatur

- Überflutungen
- Tropische Zyklonen
- Trockenheiten
- Ernteaussfälle
- Feuer
- Hitzewellen



Quelle: Lange et al. 2020 Earth's Future

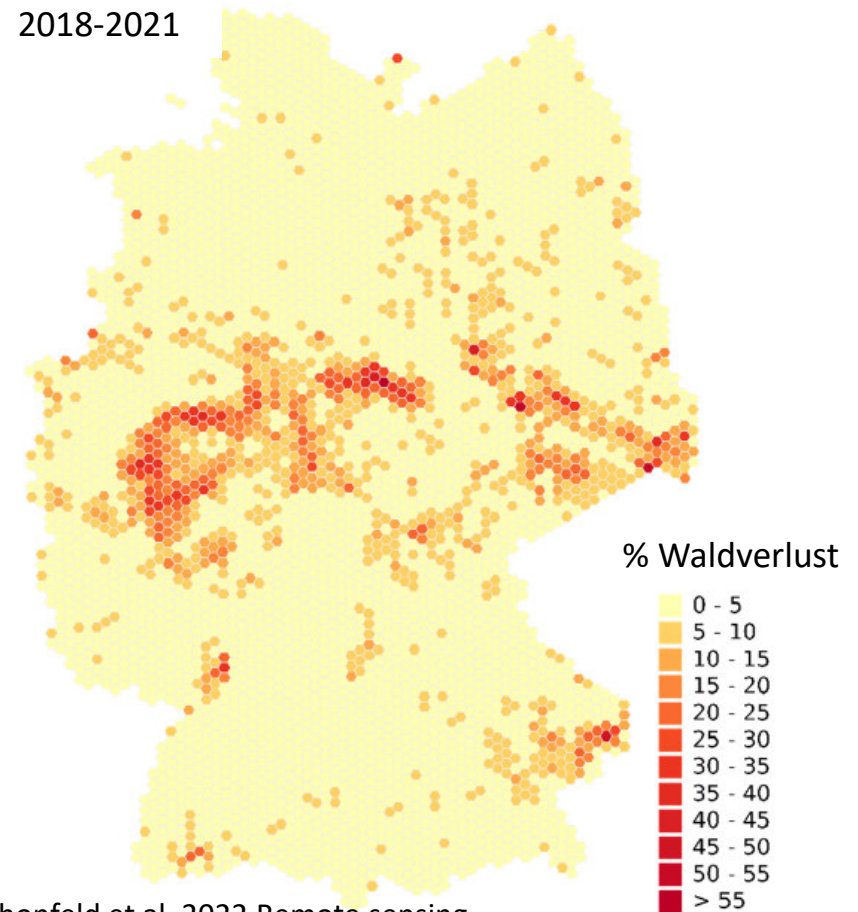
# Folgen



Foto: Sören Hese, FSU Jena

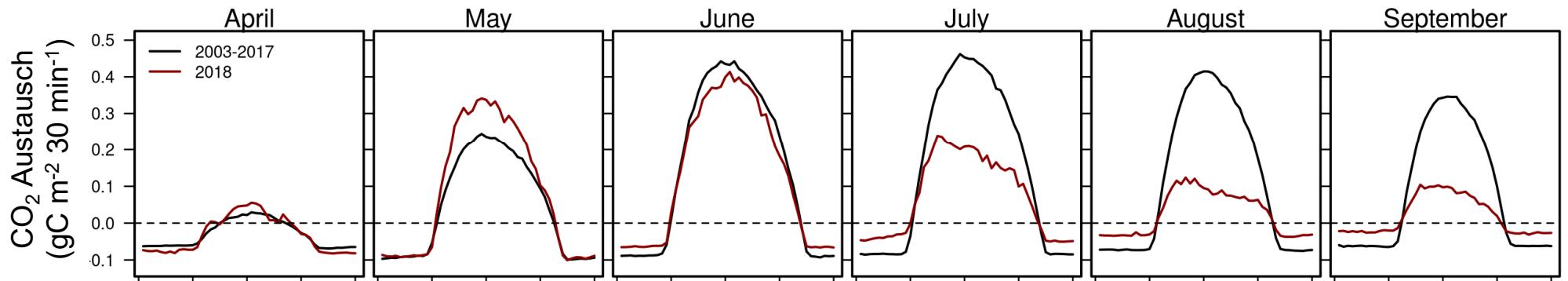


2018-2021



Thonfeld et al. 2022 Remote sensing

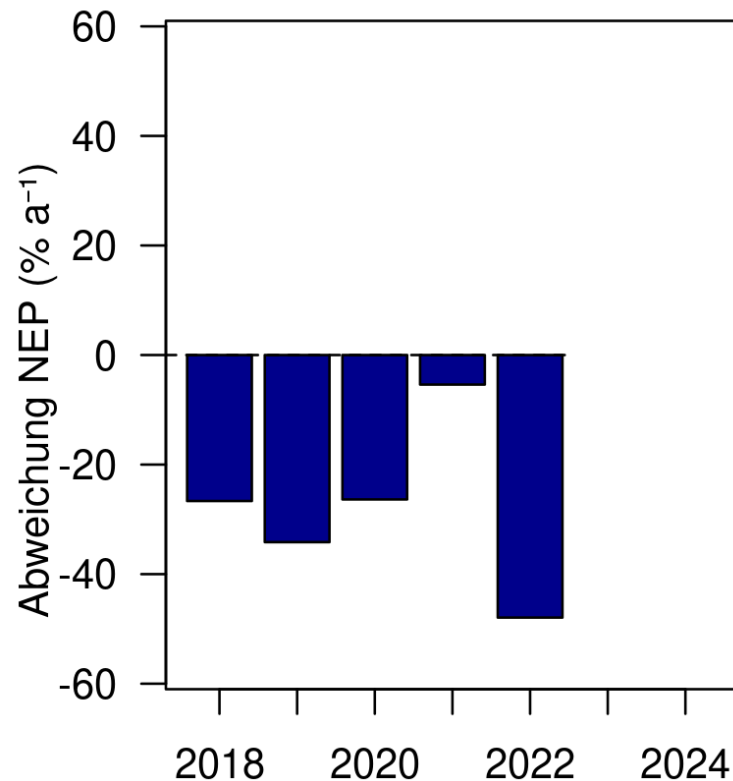
## Reduzierte CO<sub>2</sub>-Aufnahme im Sommer 2018



Klosterhalfen et al. unpubl.

- Im Frühjahr mehr CO<sub>2</sub>-Aufnahme als im Durchschnitt
- Im August an einzelnen Tagen in der Summe eine Netto-Quelle für CO<sub>2</sub>

## Netto-Ökosystemproduktion von 2018 – 2024

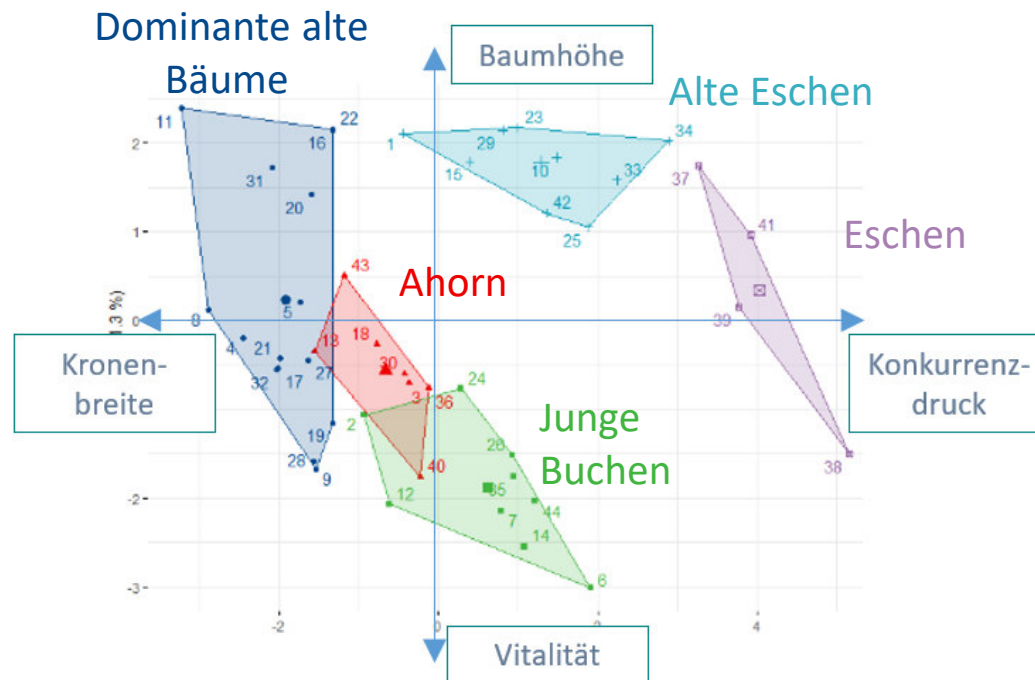


- Nach 2018 CO<sub>2</sub>-Aufnahme deutlich reduziert (bis ca. -45%).
- starker Anstieg der Mortalität alter Bäume
- Ab 2023 CO<sub>2</sub>-Aufnahme wieder erholt

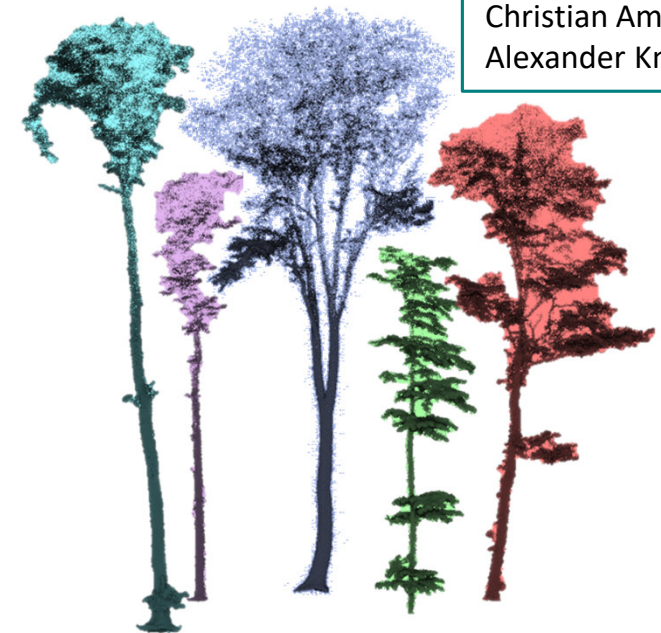
Klosterhalften, Markwitz et al. unpubl.

# Rolle von Struktur für Resilienz ?

Baumgruppen reagieren unterschiedlich

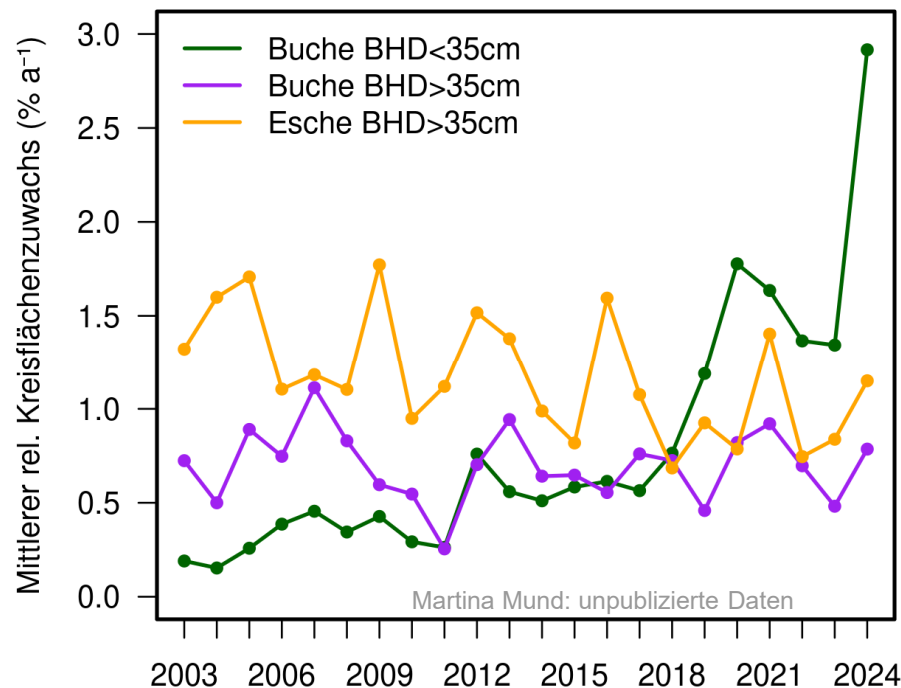


Rüter et al., unpubl.



DIGITAL FOREST Project  
Franziska Koebsch  
Maira Rüter  
Marius Heidenreich  
Martina Mund  
Dominik Seidel  
Christian Ammer  
Alexander Knohl

# Stammzuwachs



BHD = Brusthöhendurchmesser (Durchmesser eines Baumes in 1.3 m Höhe)

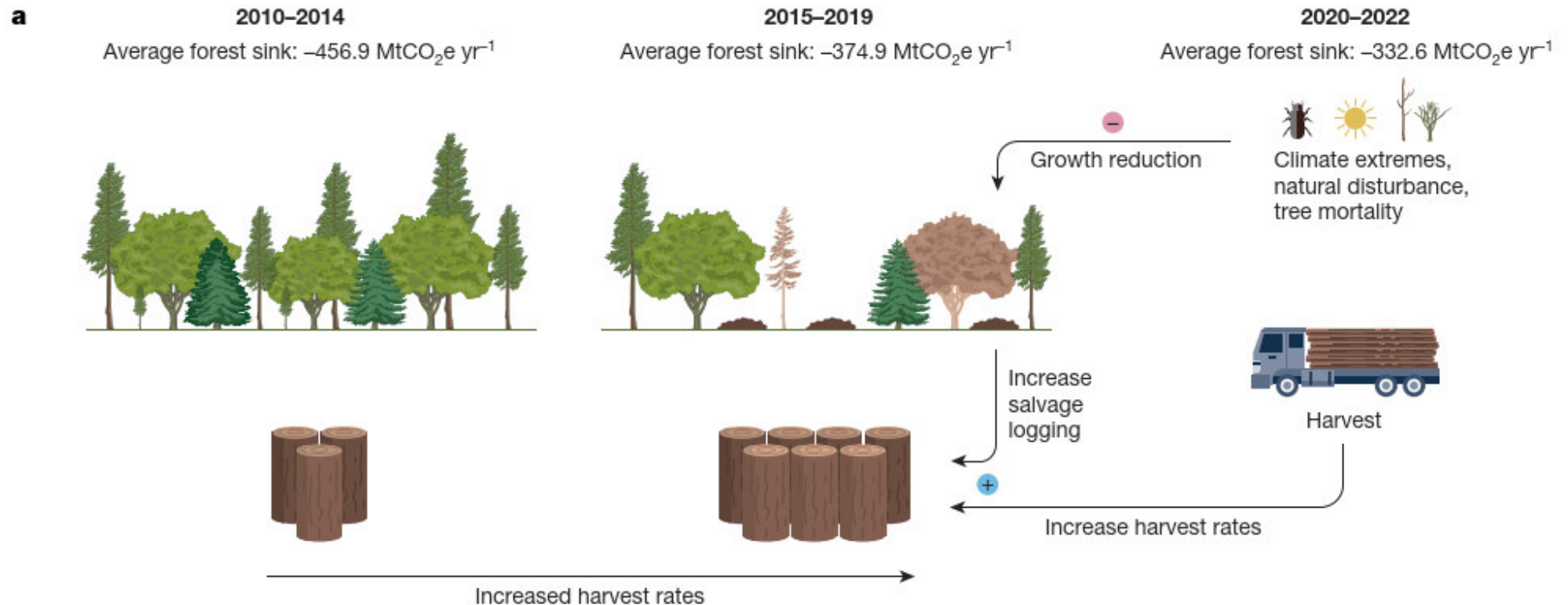
- Zuwachs älterer Eschen und Buchen (BHD > 35 cm) stagnierte.
- aber Zuwachs jüngerer Buchen (BHD < 35 cm) nahm zu.
- gestiegene Mortalität bei alten Bäumen bietet mehr Licht für jüngere Bäume.
- Beispiel von Resilienz eines arten- und strukturreichen Waldes

# Nationalpark Hainich – Alte Buchenwälder



- Nationalpark seit 1997
- Teil des Waldnaturerbe Alte Buchenwälder

# Beitrag der europäischen Wälder zum Klimaziel

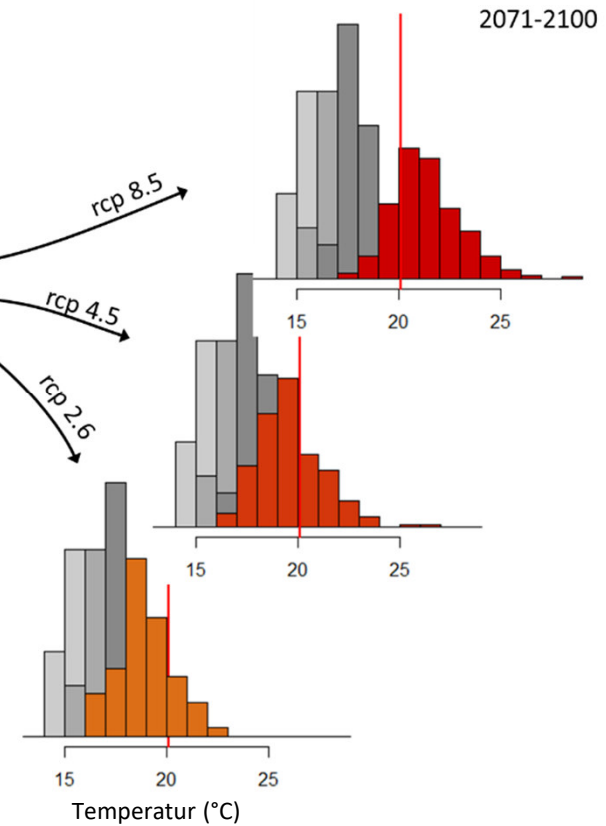
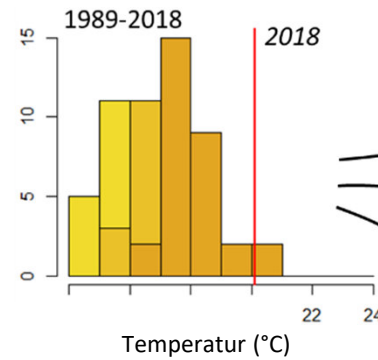
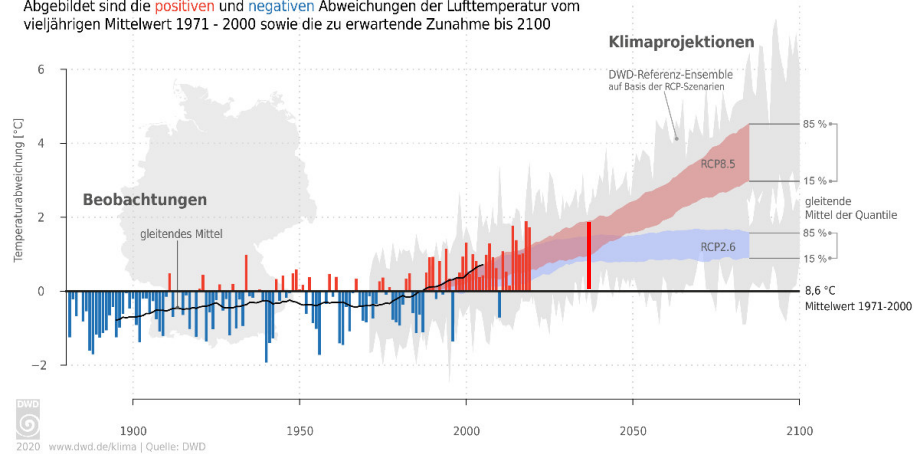


Quelle: Migliavacca et al. 2025

# Was kommt in Zukunft auf uns zu?

## Deutschland im Klimawandel

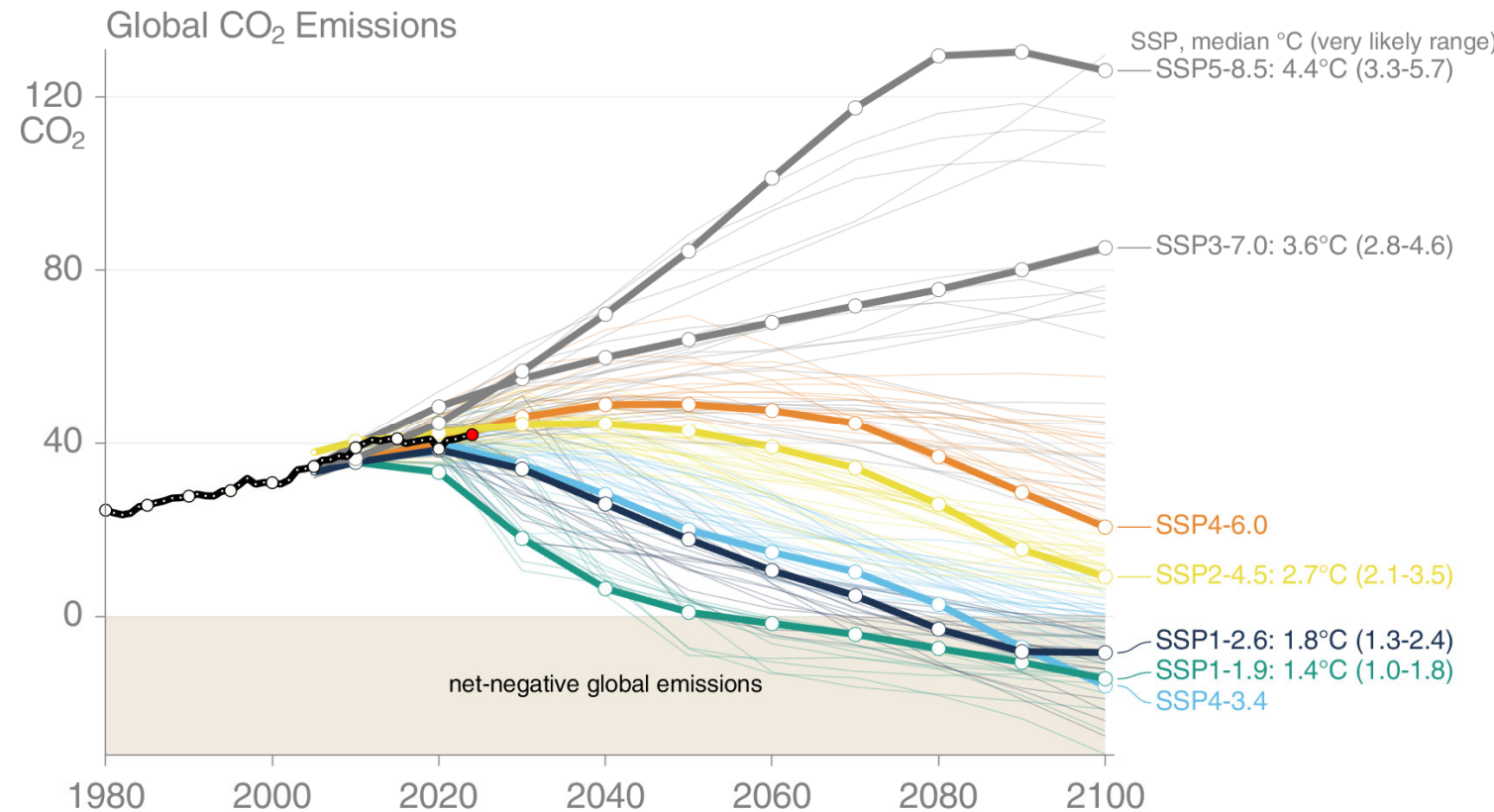
Abgebildet sind die **positiven** und **negativen** Abweichungen der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1971 - 2000 sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100



Quelle: Tobias Mette, LWF Weihenstephan

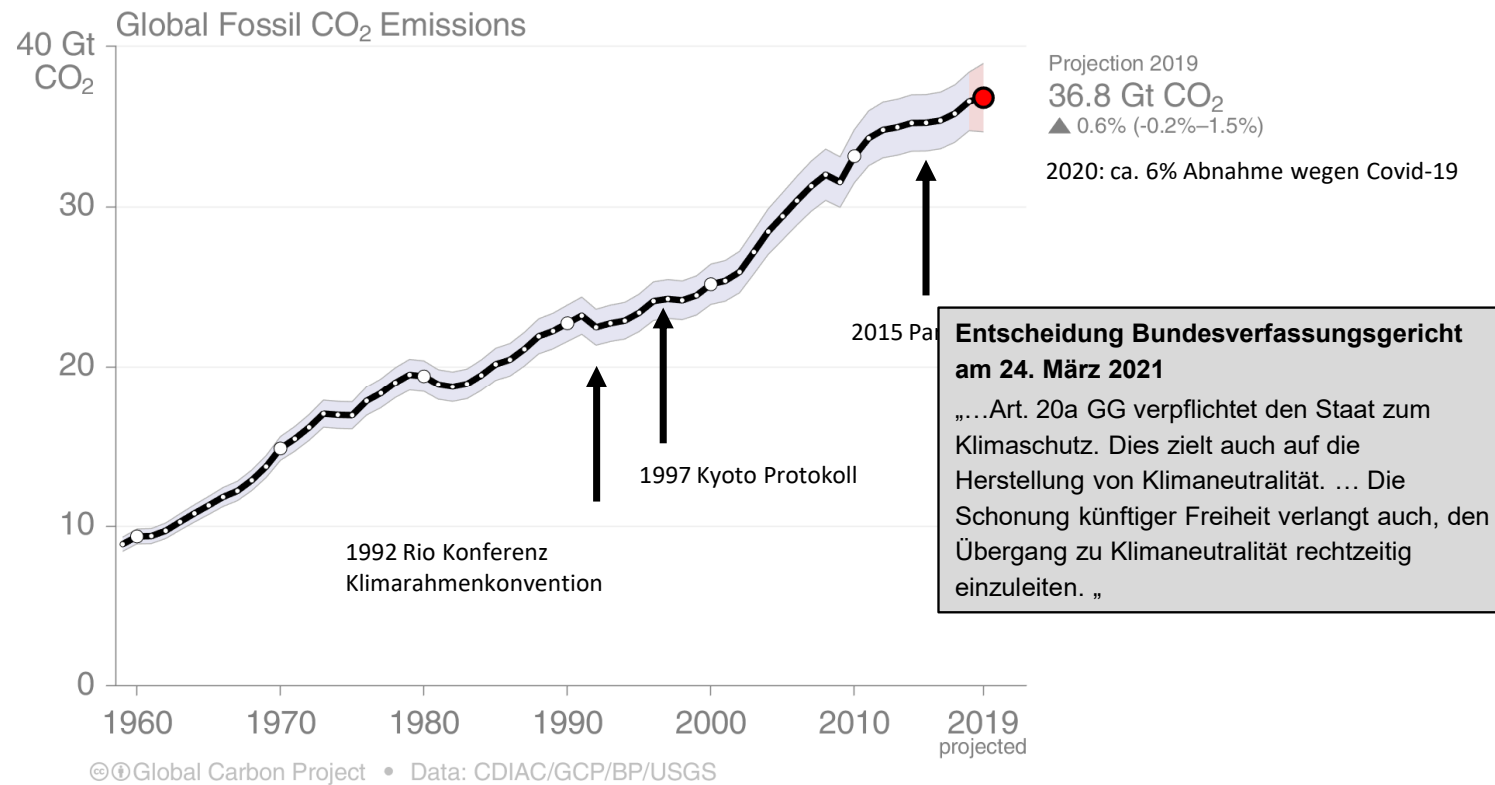
# Was muss für 1.5°C Ziel getan werden?

- CO<sub>2</sub> Emissionen müssten jetzt fallen.
- Ab 2050/80 brauchen wir negative CO<sub>2</sub> Emissionen.
- Wälder können nur begrenzt helfen.



Global Carbon Budget, 2024

© Global Carbon Project • Data: Riahi et al (2017), Rogelj et al (2018), SSP Database (version 2)



Friedlingstein et al. 2019

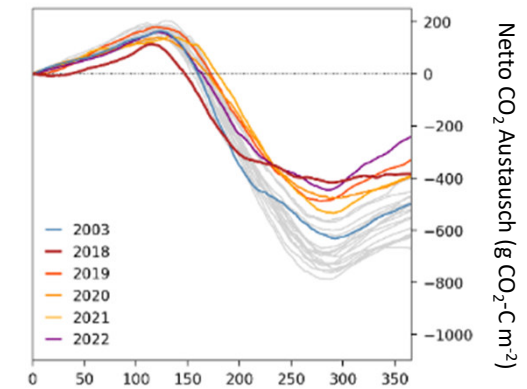
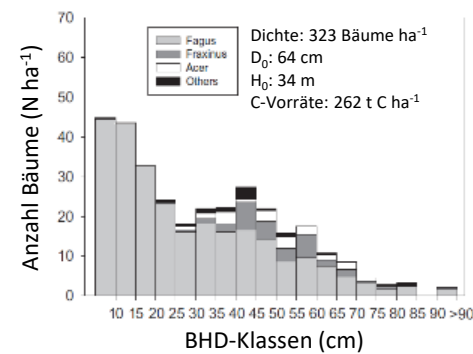
# Fragen

- Wie stabil ist die Kohlenstoff-Aufnahme eines alten Waldes über 2 Jahrzehnte?
- Welche Auswirkung haben extreme Trockenheiten auf die Kohlenstoff-Aufnahme?

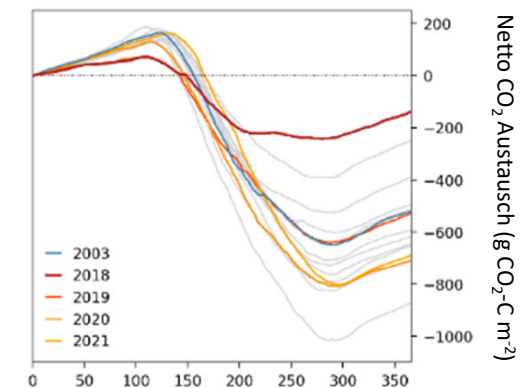
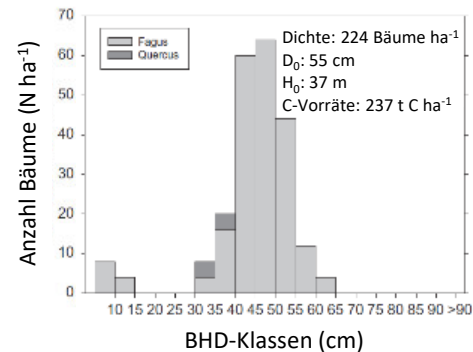


# CO<sub>2</sub> Flüsse in Dürrejahre 2018-2022

**Hainich**  
 Strukturreicher,  
 buchendominierter  
 Laubmischwald



**Leinefelde**  
 Homogener  
 Buchenreinbestand



Tag im Jahr

Herbst et al. 2015, doi:10.1016/j.foreco.2015.05.034; Tamrakar et al. 2018, doi:10.1016/j.agrformet.2018.08.027.