

# Trockenheit und Dürre heute und morgen

Was erwartet uns in der Zukunft?

Prof. Dr. Andreas Christen



42. Freiburger Winterkolloquium - Forst und Holz

Geht dem Wald das Wasser aus? Auswirkungen der Trockenheit auf die Forst- und Holz

Photo: A. Christen

# Trockenheit und Dürre heute und morgen

- War das Jahr 2022 klimatologisch aussergewöhnlich? - Oder ist das unsere neue Normalität?
- Wie verstärken sich Dürren und Hitzewellen gegenseitig?
- Was erwartet uns in der Zukunft?
- Gibt es Kipppunkte? - Beispiel aus der Forschung an der Uni Freiburg



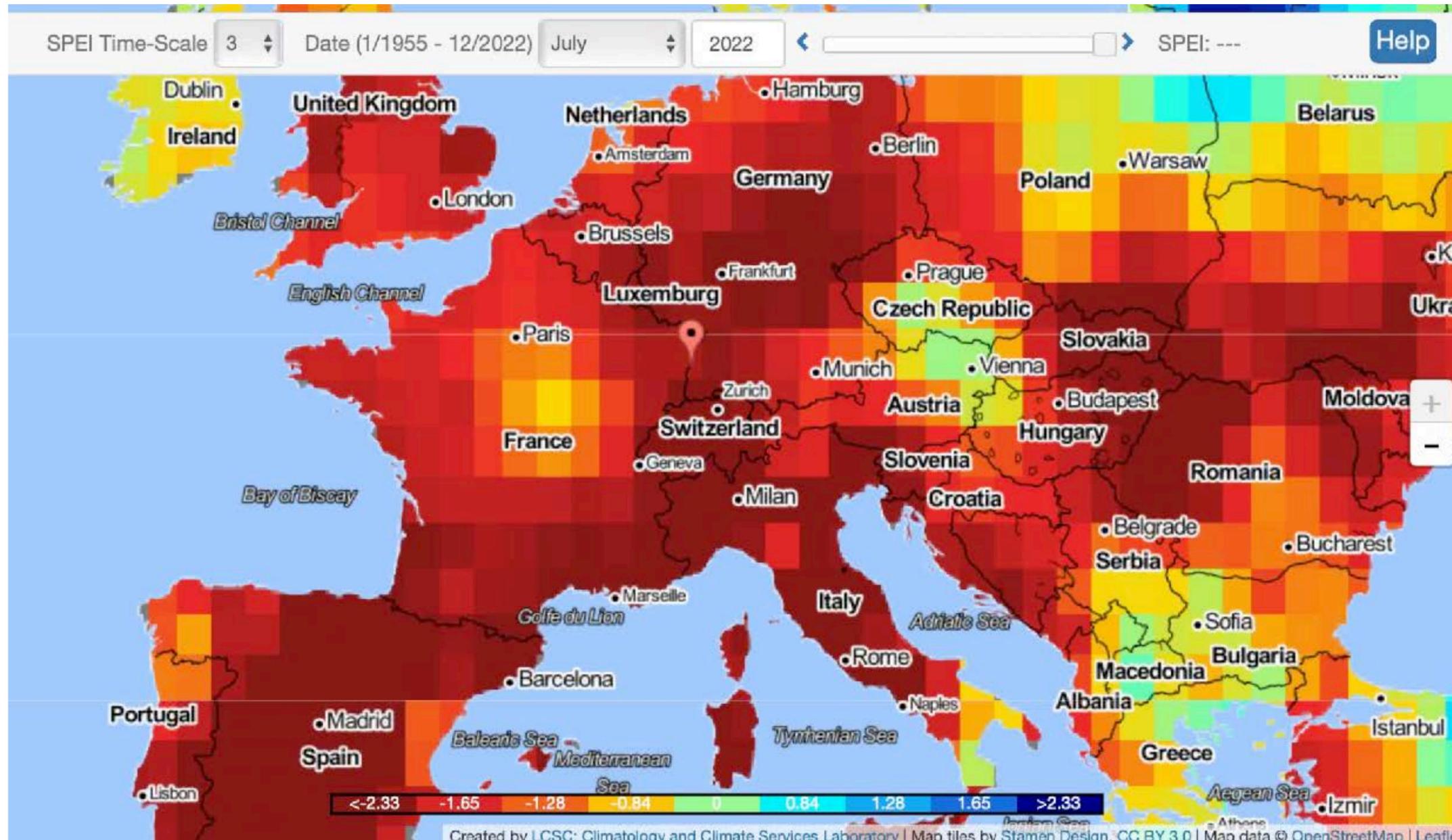
Photo: A. Christen

Das Jahr 2022 war in Baden-Württemberg mit 10,9 °C (8,1 °C 1960-1990) das **wärmste Jahr seit Messbeginn**. Ein bundesweites jährliches **Niederschlagsdefizit** von -15% im Vergleich zur Referenzperiode 1961 -1990 führte zur geringsten Bodenfeuchte unter Gras seit 1961.

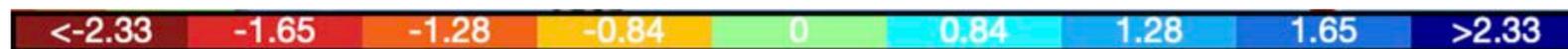
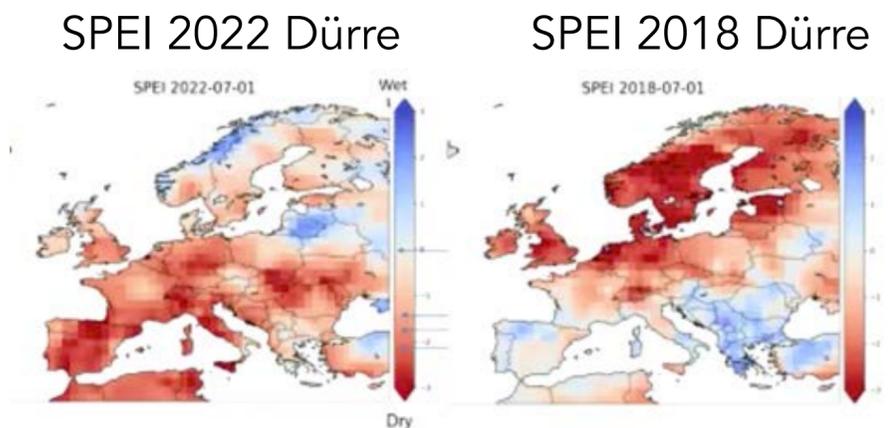
Quelle: DWD, Pressemitteilung vom 23.01.2023

Bild: Trockenheit und Hitze in der Region Freiburg im August 2022 (Photo: A. Christen)

# Trockenheit in Europa im Jahr 2022



SPEI = Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, ein Wert für die Stärke einer Dürre



Dürre

Trockenheit

Niederschlagsüberschuss

Quelle: Global drought monitor, <https://spei.csic.es/>

Prof. Dr. Andreas Christen  
42. Freiburger Winterkolloquium Forst und Holz  
Trockenheit und Dürre heute und morgen

2022 schien die Sonne Deutschlandweit etwa 30 Prozent über dem Referenzwert der Periode 1961 - 1990 (1544 Stunden). In Baden-Württemberg erreichte die Sonnenscheindauer mit 2185 Stunden (1607 Stunden) sogar einen neuen Rekordwert.



Quelle: DWD, Pressemitteilung vom 23.01.2023

Bild: Sonne im Juli 2022 am Schönberg bei Freiburg (Photo: A. Christen)



# Forstmeteorologische Messstelle der Uni Freiburg in Hartheim (Rheinebene)

Photo: A. Christen

**ICOS**

INTEGRATED  
CARBON  
OBSERVATION  
SYSTEM

UNI  
FREIBURG

# Strahlungsmessungen

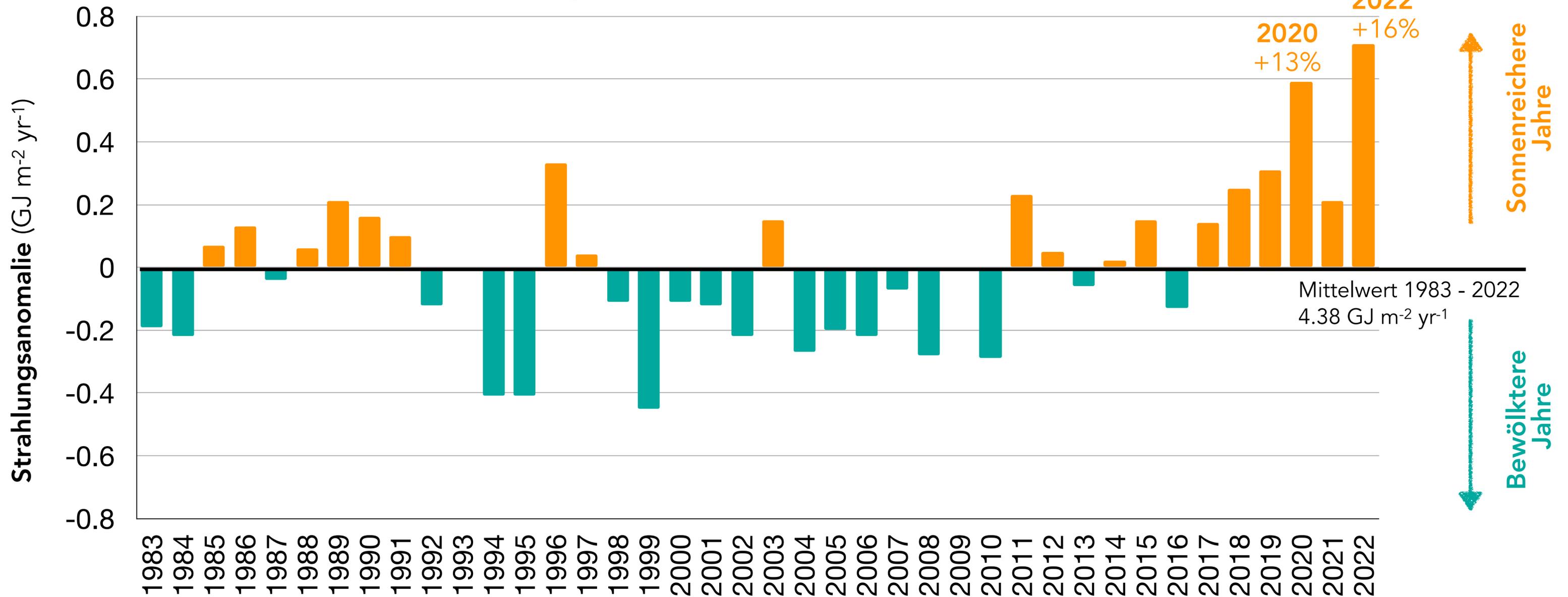


# Messungen der Globalstrahlung auf 30 m über dem Waldbestand



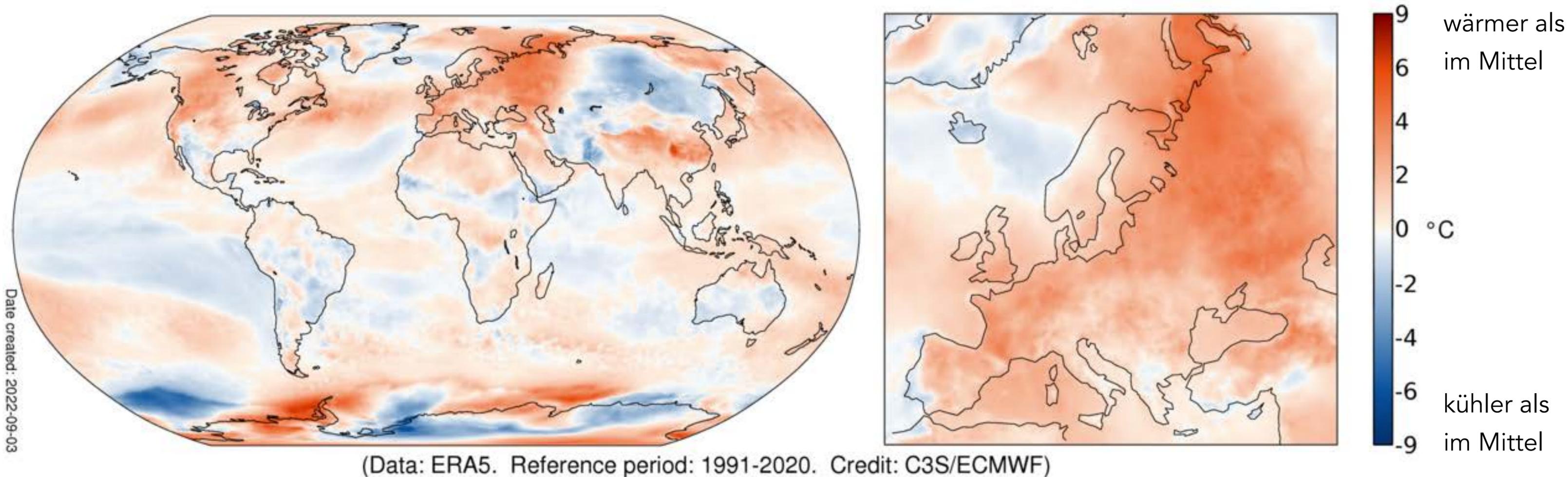
# Sonnenscheinanomalie

Jahressummen Globalstrahlung Hartheim 1983 - 2022 (De-Har)



# Sommer 2022 in Europa und weltweit

Surface air temperature anomaly for August 2022



PROGRAMME OF  
THE EUROPEAN UNION



# Das Jahr 2022 weltweit

- **Dezember 2022** war weltweit der **achtwärmste** Dezember der letzten 143 Jahre.
- **November 2022** war weltweit der **neuntwärmste** November der letzten 143 Jahre.
- **Oktober 2022** war weltweit der **viertwärmste** Oktober der letzten 143 Jahre.
- **September 2022** war weltweit der **fünftwärmste** September der letzten 143 Jahre.
- **August 2022** war weltweit der **sechstwärmste** August der letzten 143 Jahre und der **wärmste** in Europa.
- **Juli 2022** war weltweit der **sechstwärmste** Juli der letzten 143 Jahre und der **sechstwärmste** Juli in Europa.
- **Juni 2022** war weltweit der **sechstwärmste** Juni und der **zweitwärmste** in Europa.
- **Mai 2022** war weltweit der **neuntwärmste** Mai der letzten 143 Jahre.
- **April 2022** war weltweit der **fünftwärmste** April der letzten 143 Jahre.
- **März 2022** war weltweit der **fünftwärmste** März der letzten 143 Jahre.
- **Februar 2022** war weltweit der **siebtwärmste** Februar der letzten 143 Jahre.
- **Januar 2022** war weltweit der **sechstwärmste** Januar der letzten 143 Jahre.

# Rangliste der wärmsten Jahre

## Weltweit

Platz	Jahr
1	2016
2	2020
3	2019
4	2015
5	2017
6	2022
7	2021
8	2018
9	2014
10	2010

Seit 1879 (Quelle: NOAA)

## Deutschland

Platz	Jahr
1	2022
2	2018
3	2020
4	2014
5	2019
6	2000
7	2007
8	2015
9	1994
10	2002

Seit 1881 (Quelle: DWD)

Weltweit sind die bisher **zehn wärmsten Jahre** (bis 2022) alle seit dem Jahr 2010 aufgetreten, wobei die letzten acht Jahre (2015-2022) allesamt die wärmsten acht der letzten 143 Jahre waren.

In Deutschland sind 6 der 10 wärmsten Jahre seit 1881 in **den letzten 10 Jahren** aufgetreten.

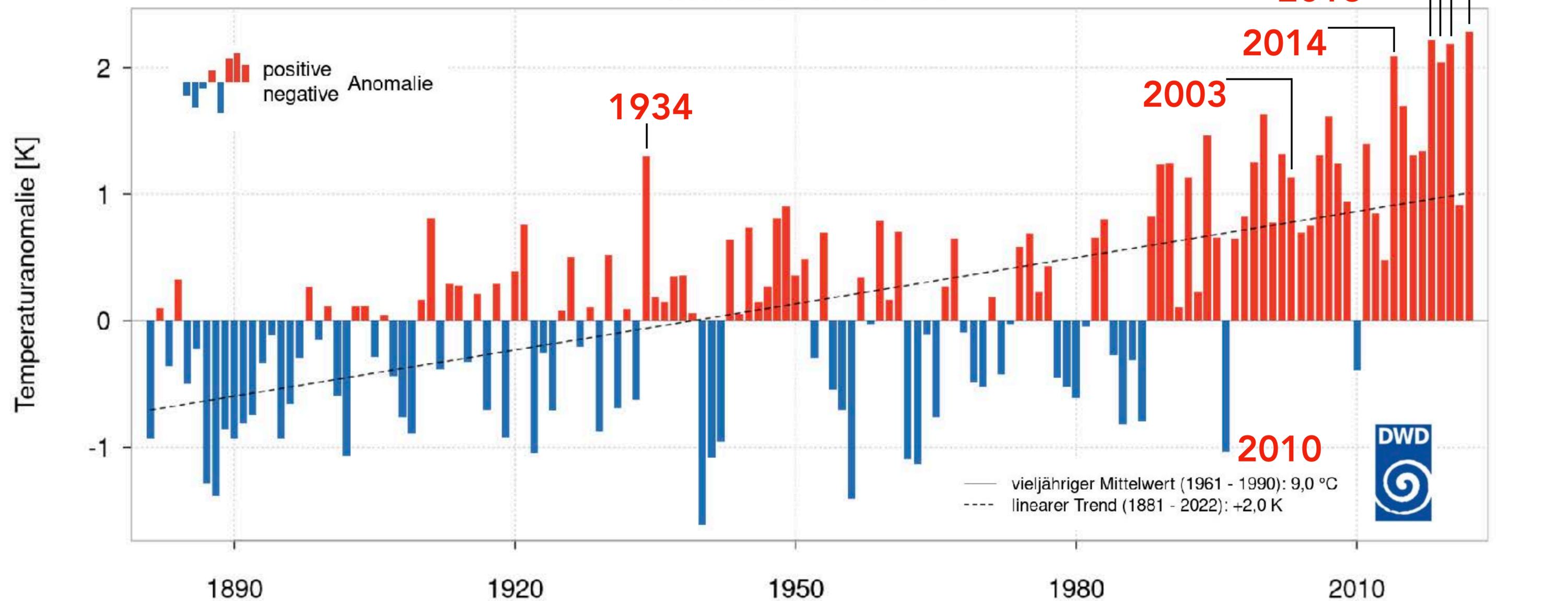
Das kann nur mit dem **Klimawandel** erklärt werden.

# Temperaturanomalie

Deutschland Jahr

1881 - 2022

Referenzzeitraum 1961 - 1990

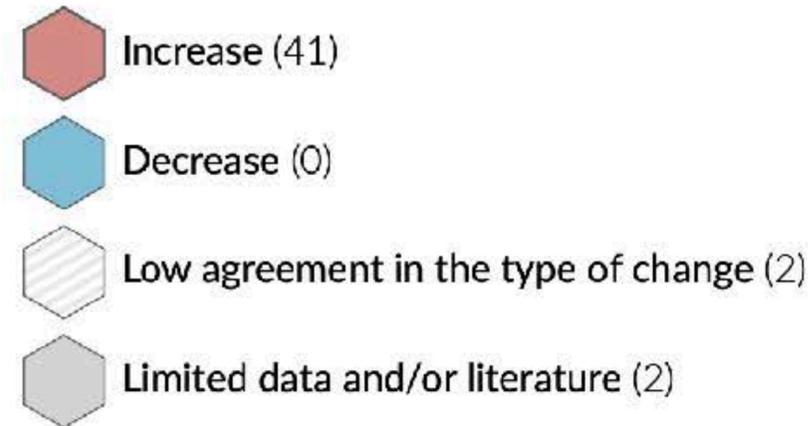


„Wir erleben inzwischen Hitzeperioden und -intensitäten, die wir aus den Klimamodellen eigentlich erst in ein paar Jahrzehnten erwartet hätten.“ *Pressemitteilung DWD 23.01.2023*

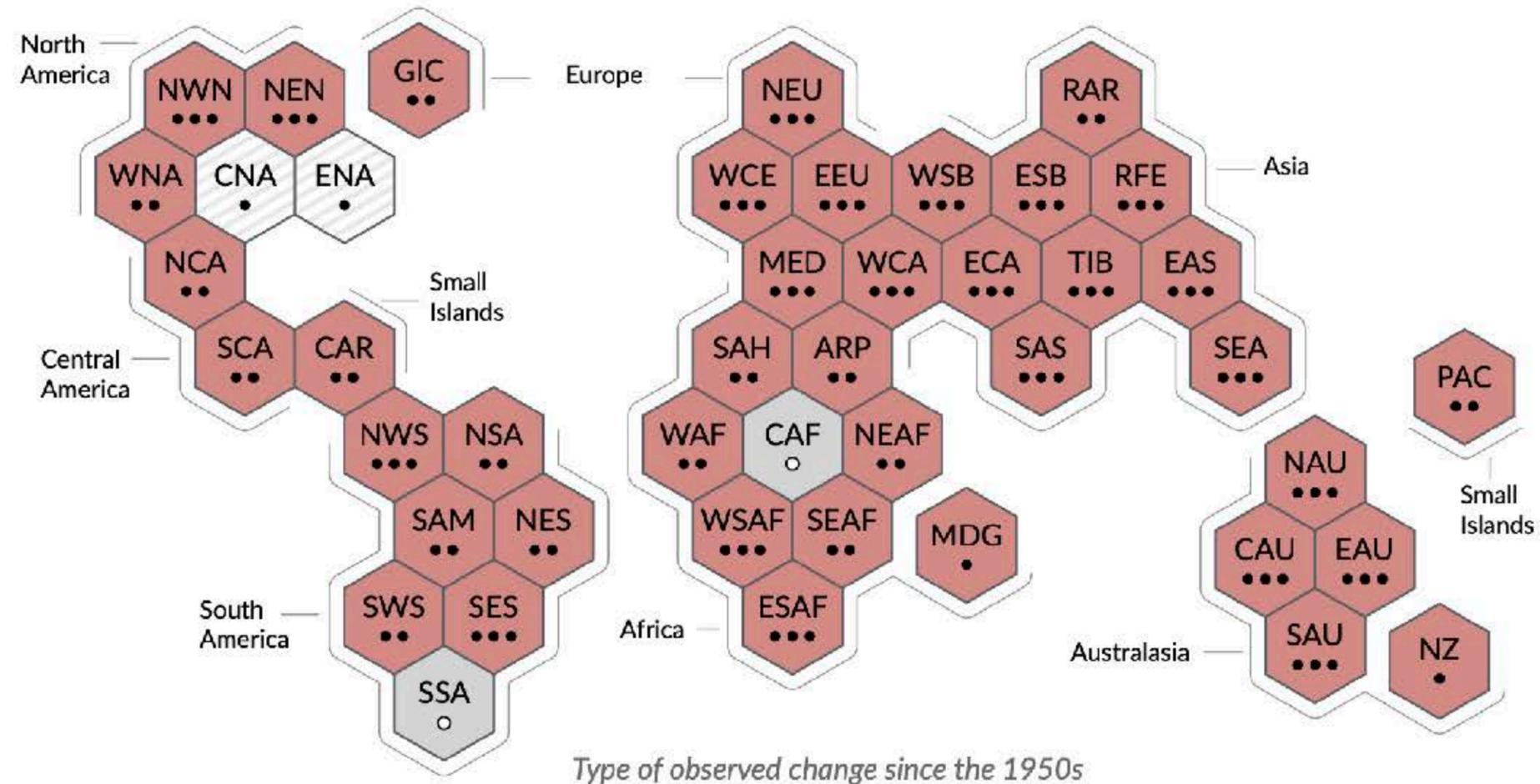
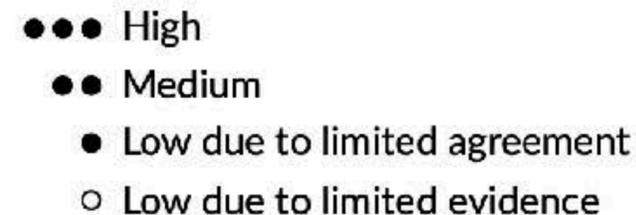
# Beobachtete globale Zunahme von Hitzewellen

a) Synthesis of assessment of observed change in **hot extremes** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change in hot extremes



Confidence in human contribution to the observed change



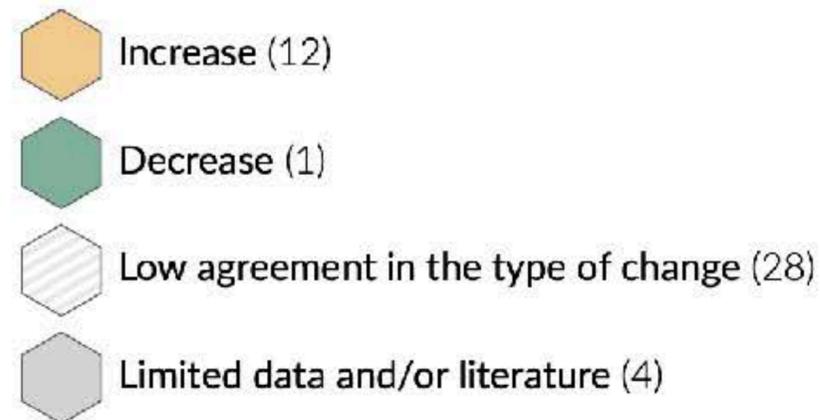
Quelle: IPCC (2021): Climate Change 2021

Die Häufigkeit von **extremer Hitze** hat seit 1950 über fast allen Landoberflächen **zugenommen**. Das ist mit hoher Sicherheit in den meisten Weltregionen dem menschenverursachten Klimawandel zuzuschreiben.

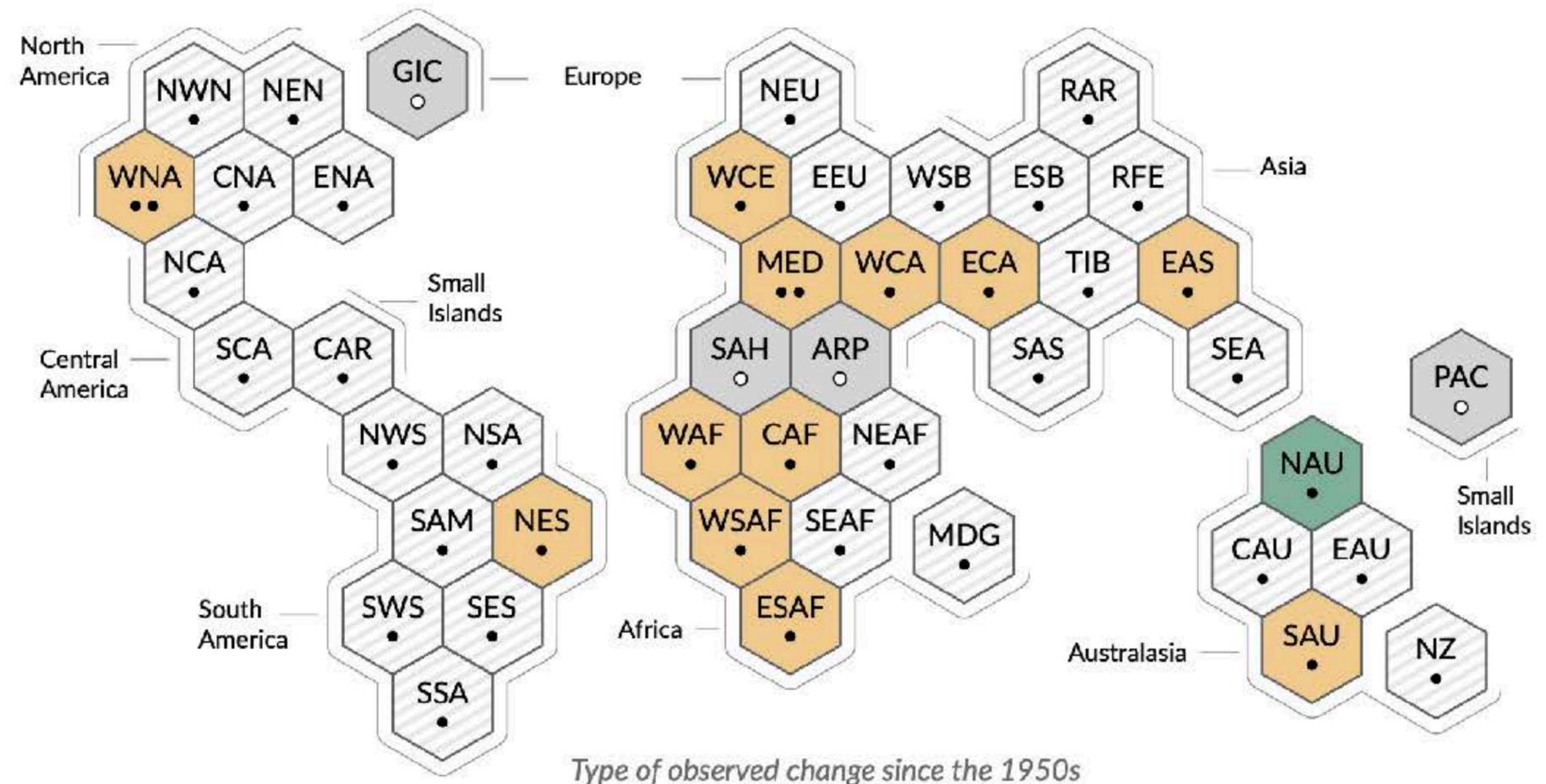
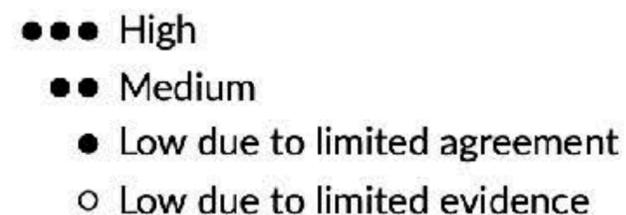
# Beobachtete globale Zunahme von Dürren

c) Synthesis of assessment of observed change in **agricultural and ecological drought** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change in agricultural and ecological drought



Confidence in human contribution to the observed change



Quelle: IPCC (2021): Climate Change 2021

Häufigere, und länger anhaltende Dürren in der Sahelzone, im Mittelmeerraum, Südafrika und Westeuropa / Westnordamerika.

# Rückkoppelung Bodenfeuchte - Klima

Warme Witterung **intensiviert** die Verdunstung was zu einer **Austrocknung der Böden** führt

Verdunstung und **Austrocknung der Böden verschiebt Energiebilanz in Richtung fühlbare Wärme**  
→ weitere Erwärmung

Geringe Verdunstung führt zu einer **Abnahme konvektiver Bewölkung** und konvektiver Niederschläge  
→ Sonnenreiche Tage und weitere Austrocknung

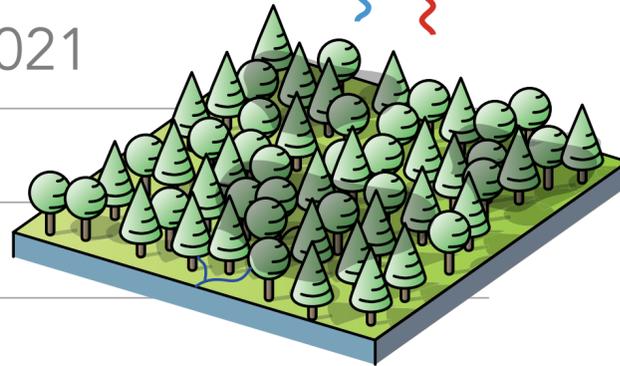


# Vergleich Sommer 2021 und 2022

2021

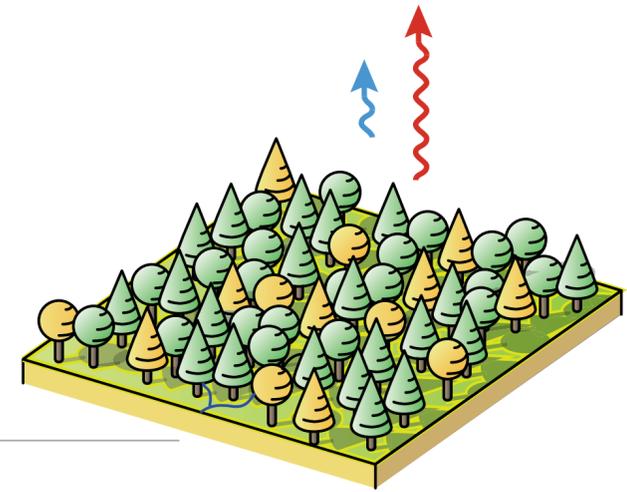


Hartheimer Wald 2021



Grösserer Anteil geht in **latentem Wärmefluss**, d.h. **Verdunstung von Wasser**

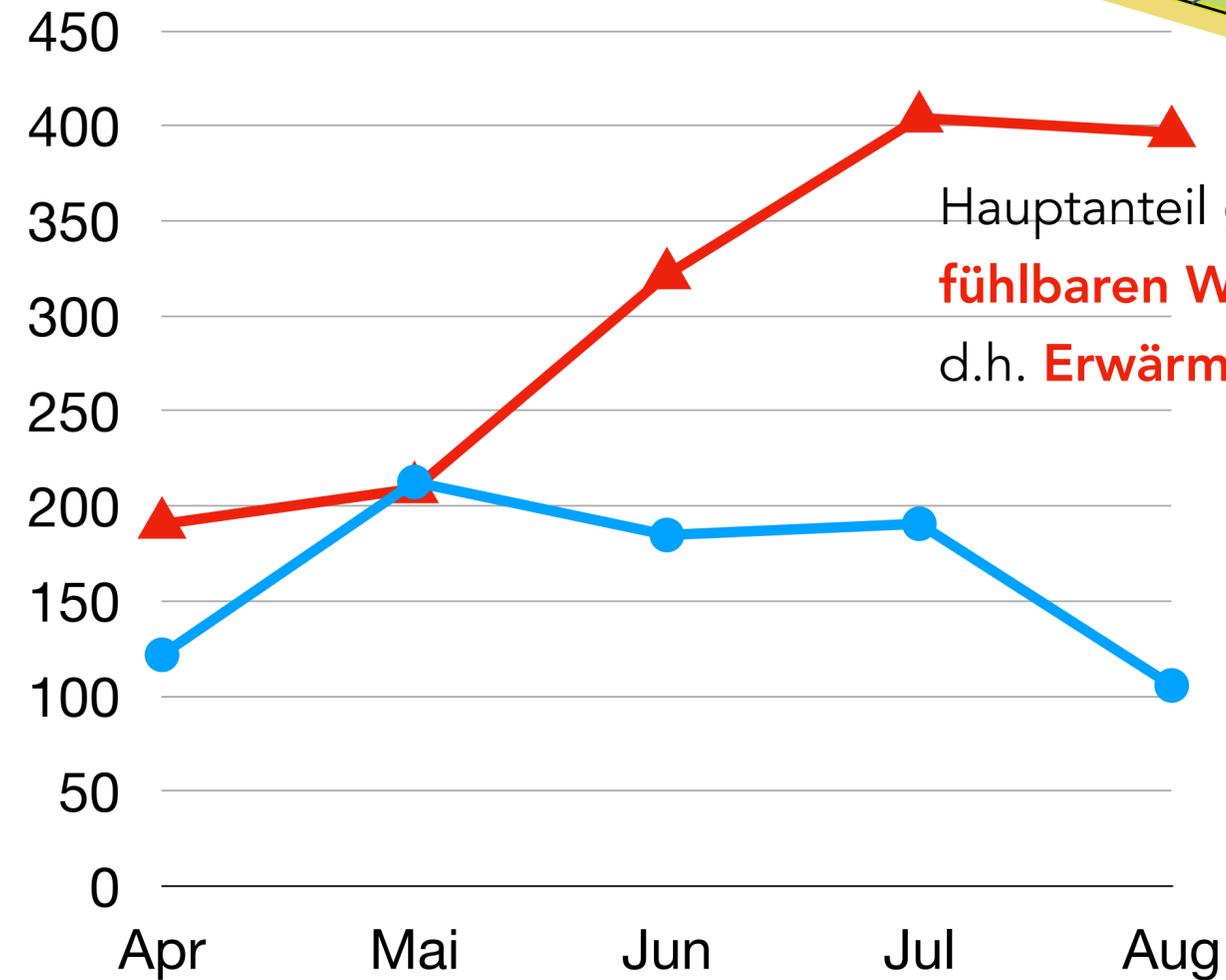
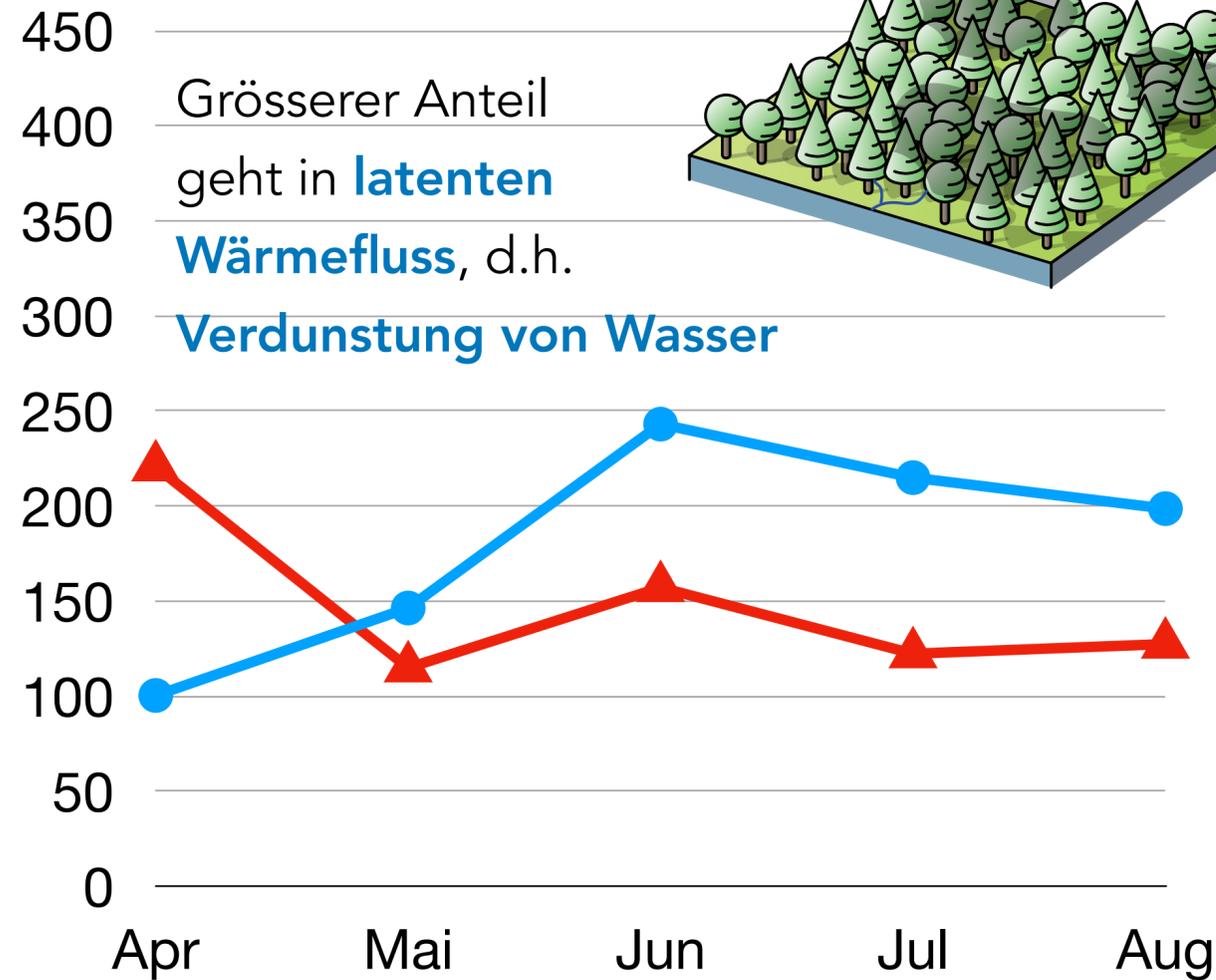
2022 - Dürre



Hartheimer Wald 2022

Hauptanteil geht in **fühlbarem Wärmefluss**, d.h. **Erwärmung der Luft**

Energieflüsse über dem Wald ( $\text{MJ m}^{-2} \text{mon}^{-1}$ )

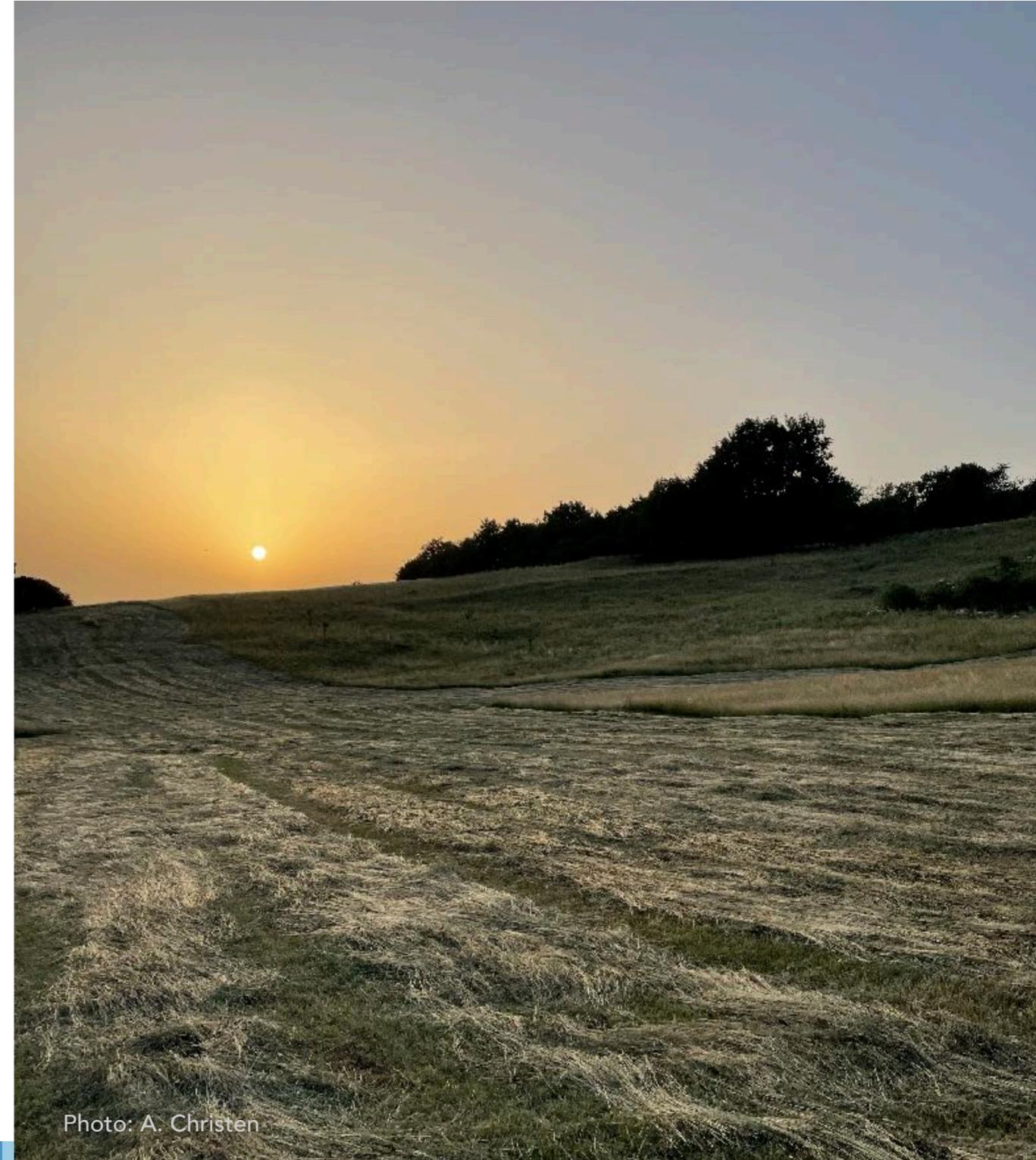


● Latenter Wärmefluss ▲ Fühlbarer Wärmefluss

# Trockenheit und Hitzewellen verstärken sich

Wir folgen: **Hitze und Trockenheit intensivieren sich gegenseitig!**

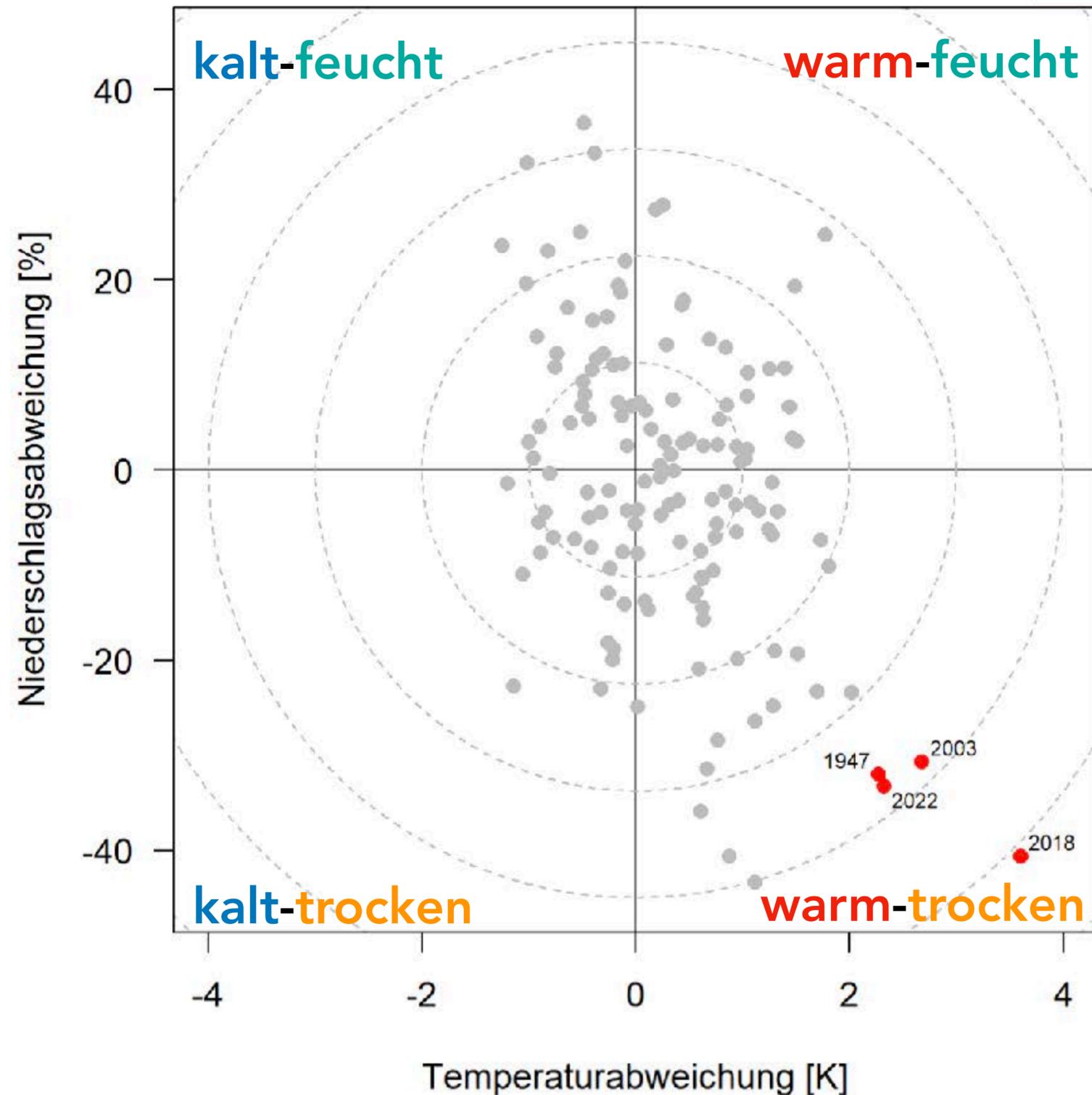
Dieser Prozess braucht Zeit - längeranhaltende **Austrocknung** der Böden und entsprechende blockierende Großwetterlagen führen durch Rückkoppelungen zwischen Bodenfeuchte, Wolken, Strahlung und Hitze **zu Dürren.**



# Thermopluviogramm Deutschland

April - August 1881 - 2022

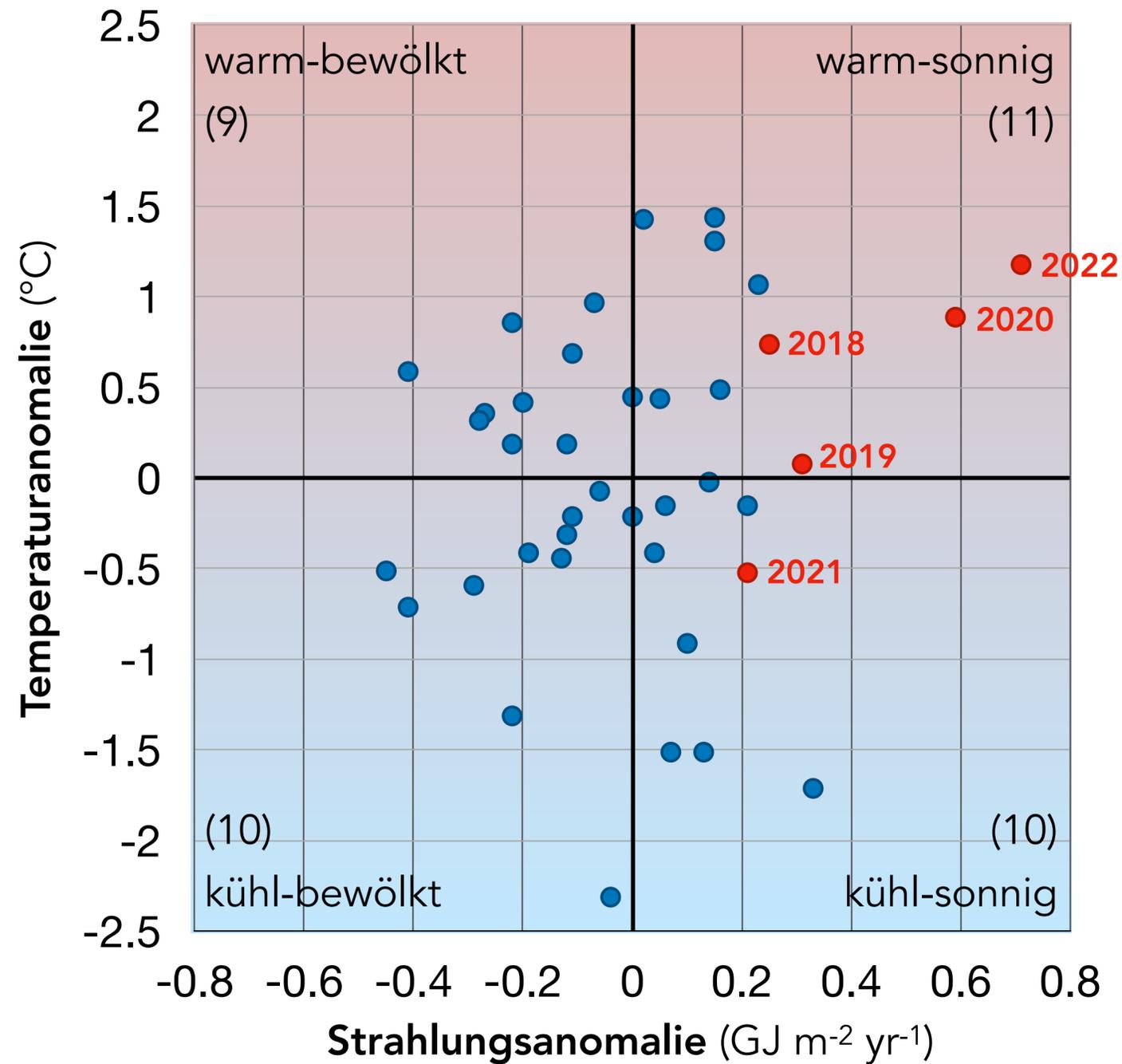
Referenzperiode 1961 - 1990



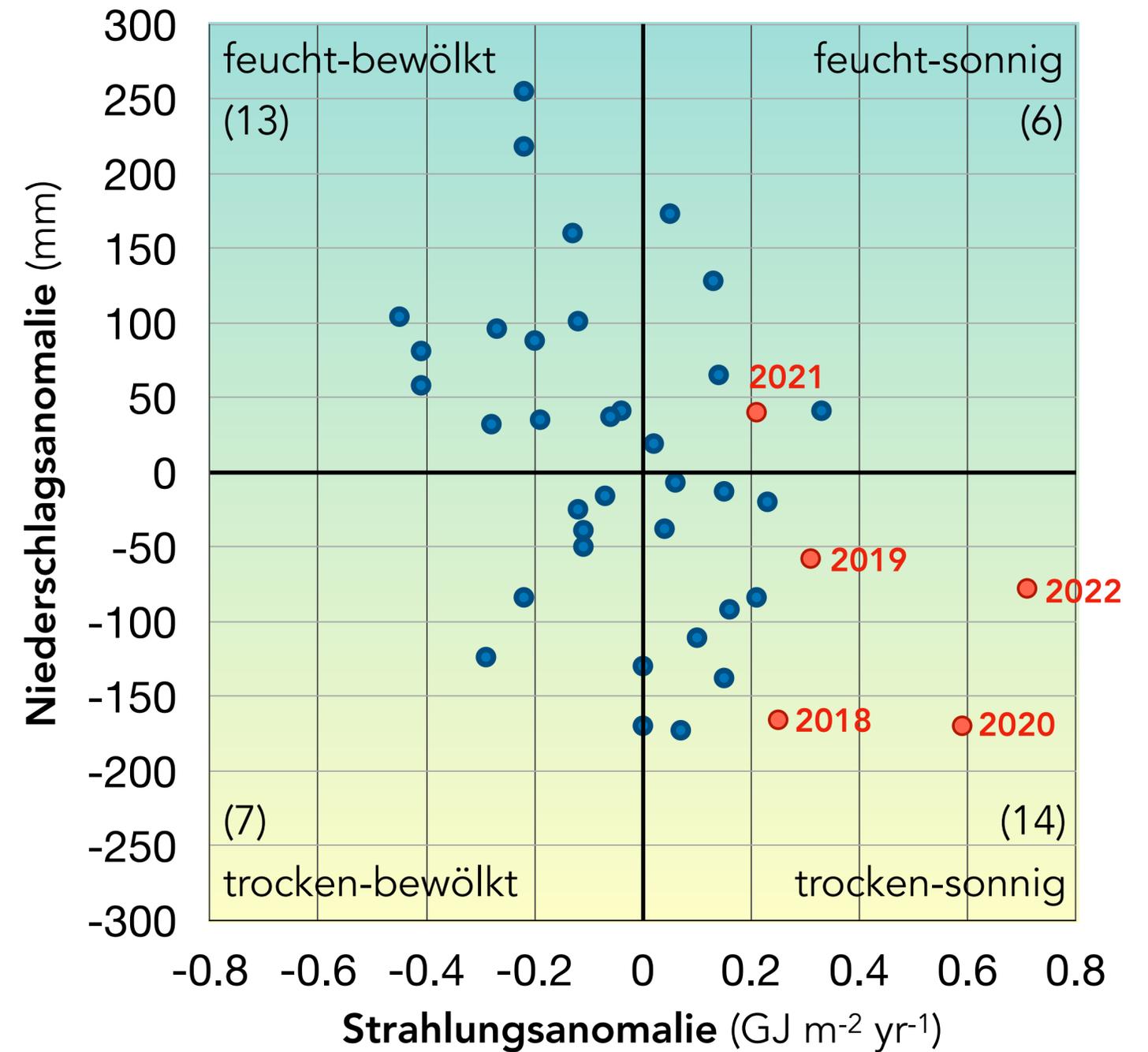
Extreme Dürresommer wie 1947, 2003, 2018 und 2022 sind gekennzeichnet durch gleichzeitige **Niederschlagsdefizite** und **hohe Temperaturen**.

# Die Rolle hoher Sonnenstrahlung

Hartheimer Wald 1983 - 2022



Hartheimer Wald 1983 - 2022

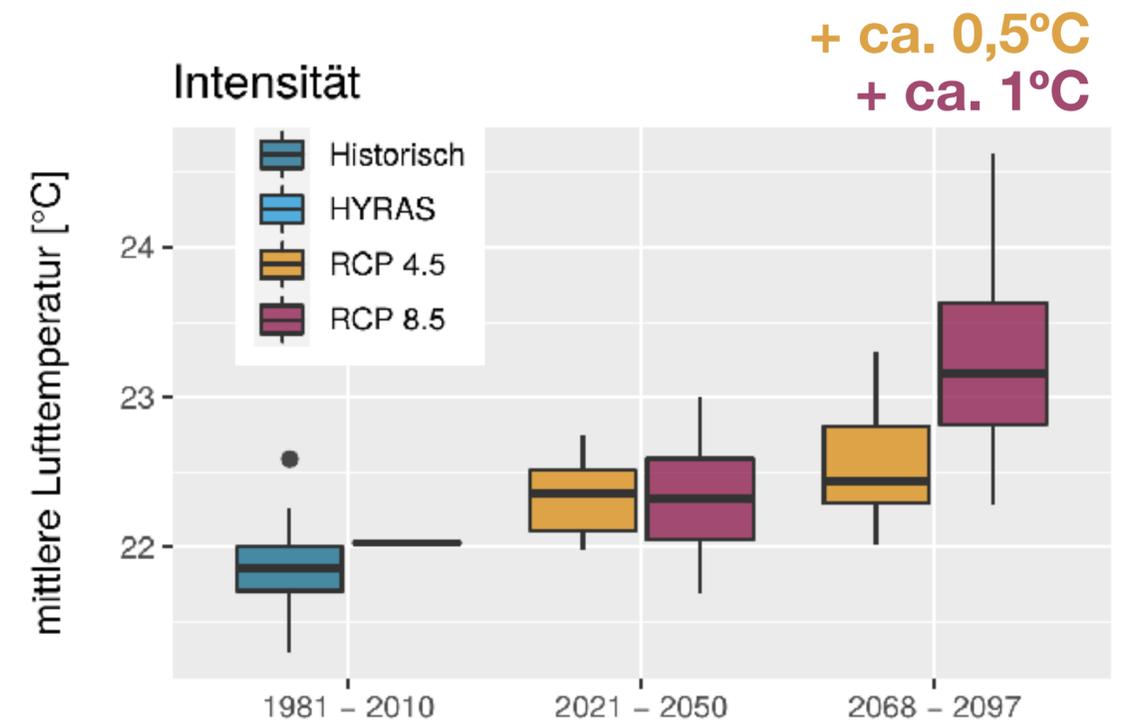
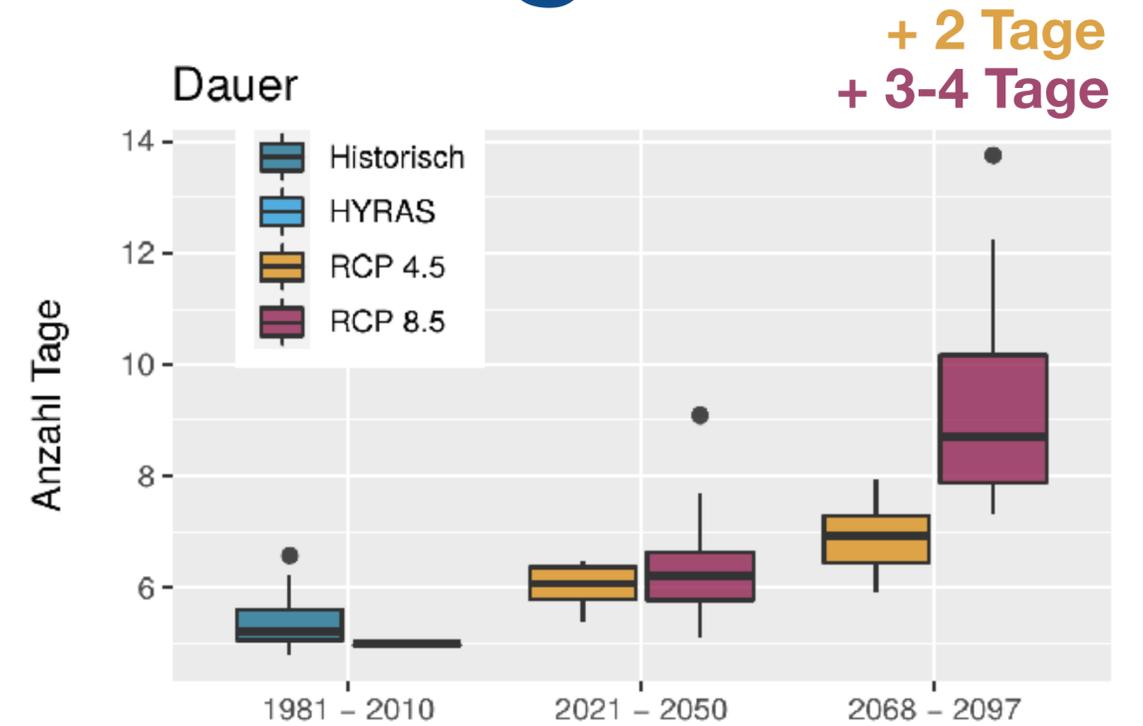
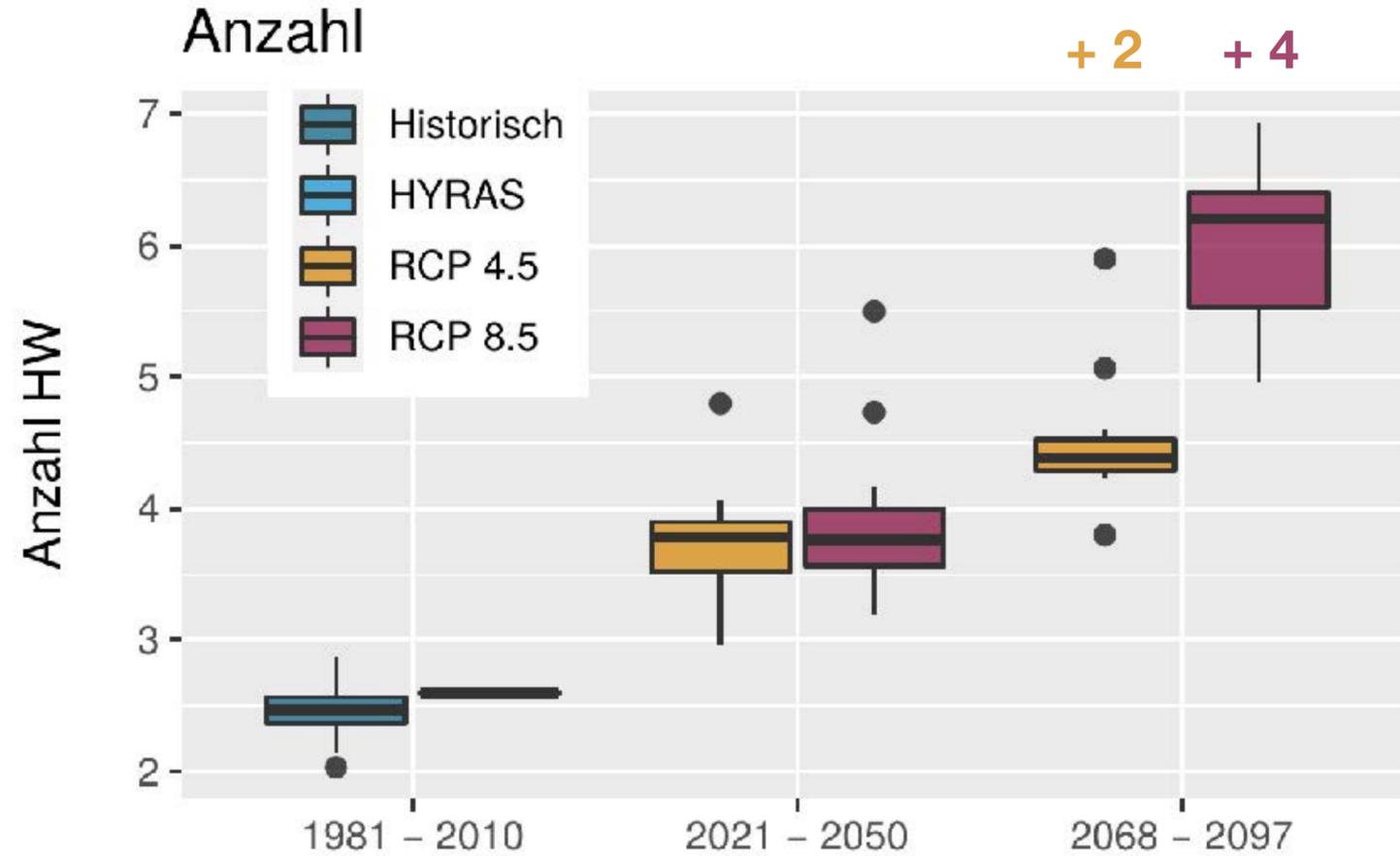


# Was erwartet uns in der Zukunft?

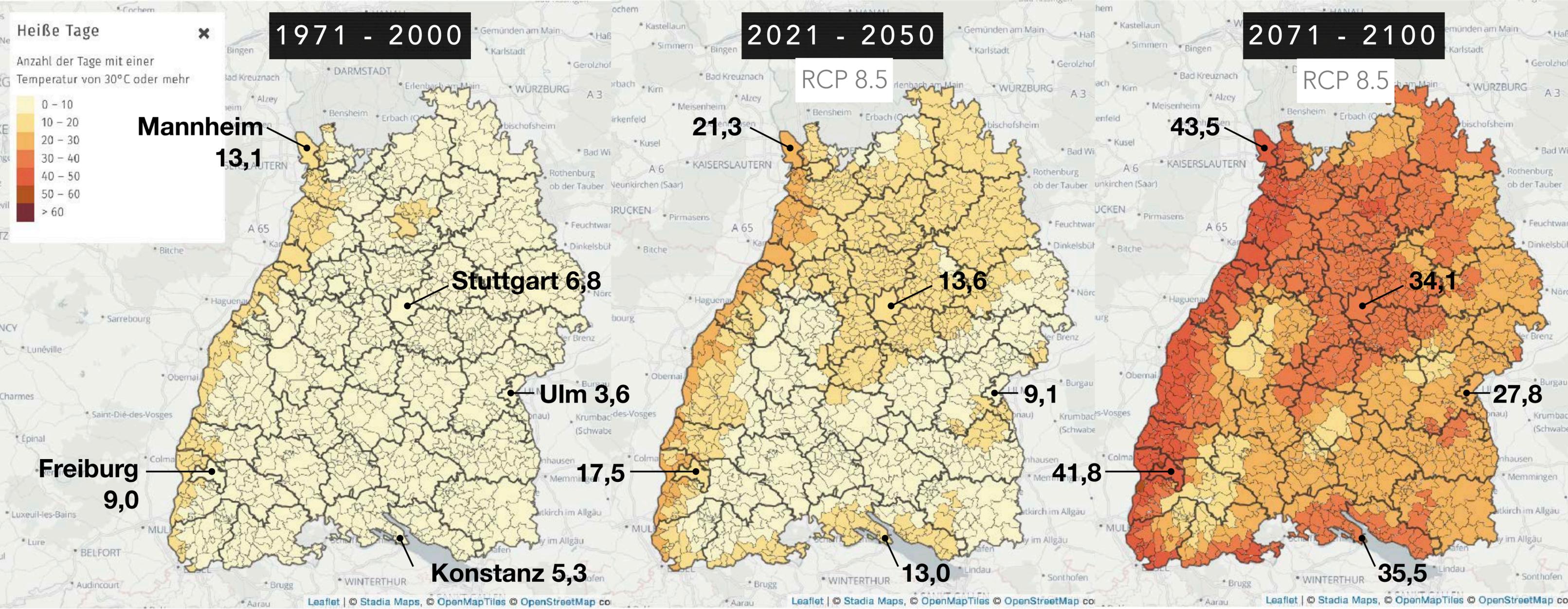


# Hitzewellen in Deutschland: Zukünftige Trends

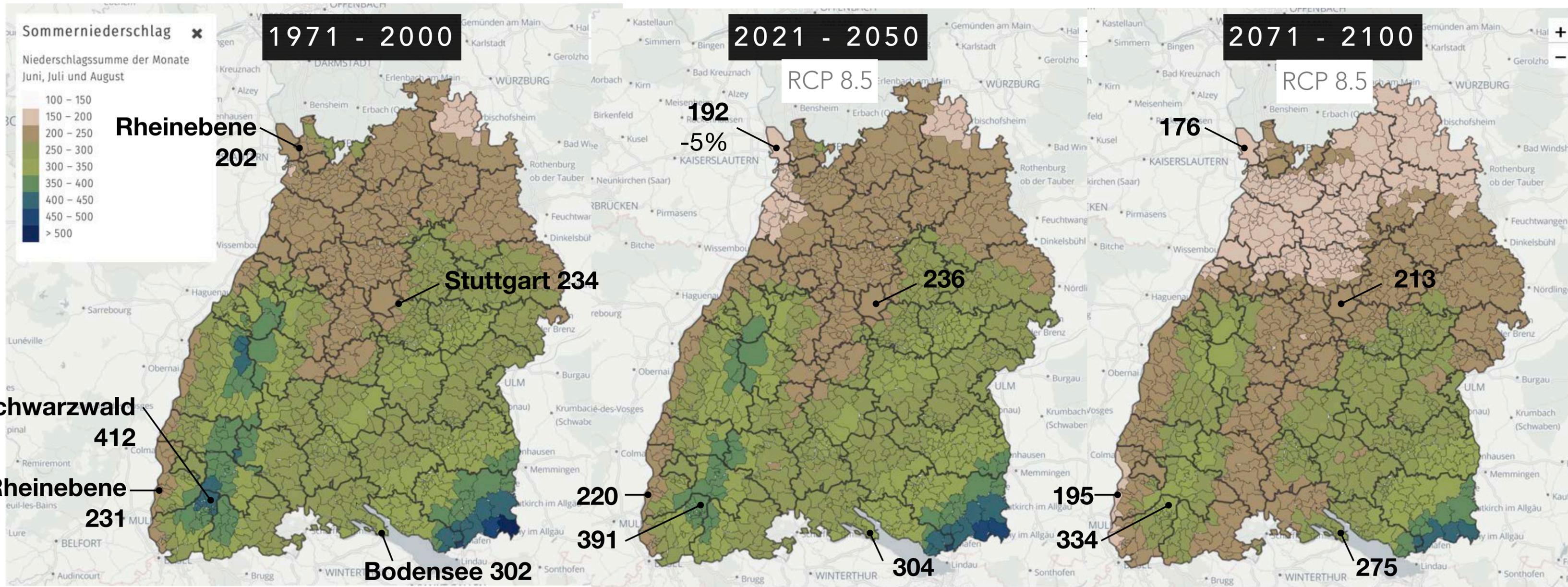
Zunahme der Hitzewellen in Deutschland  
je nach Klimaszenario 1,8 - 2,5 mehr Hitzewellen  
zum Ende des 21. Jahrhunderts:



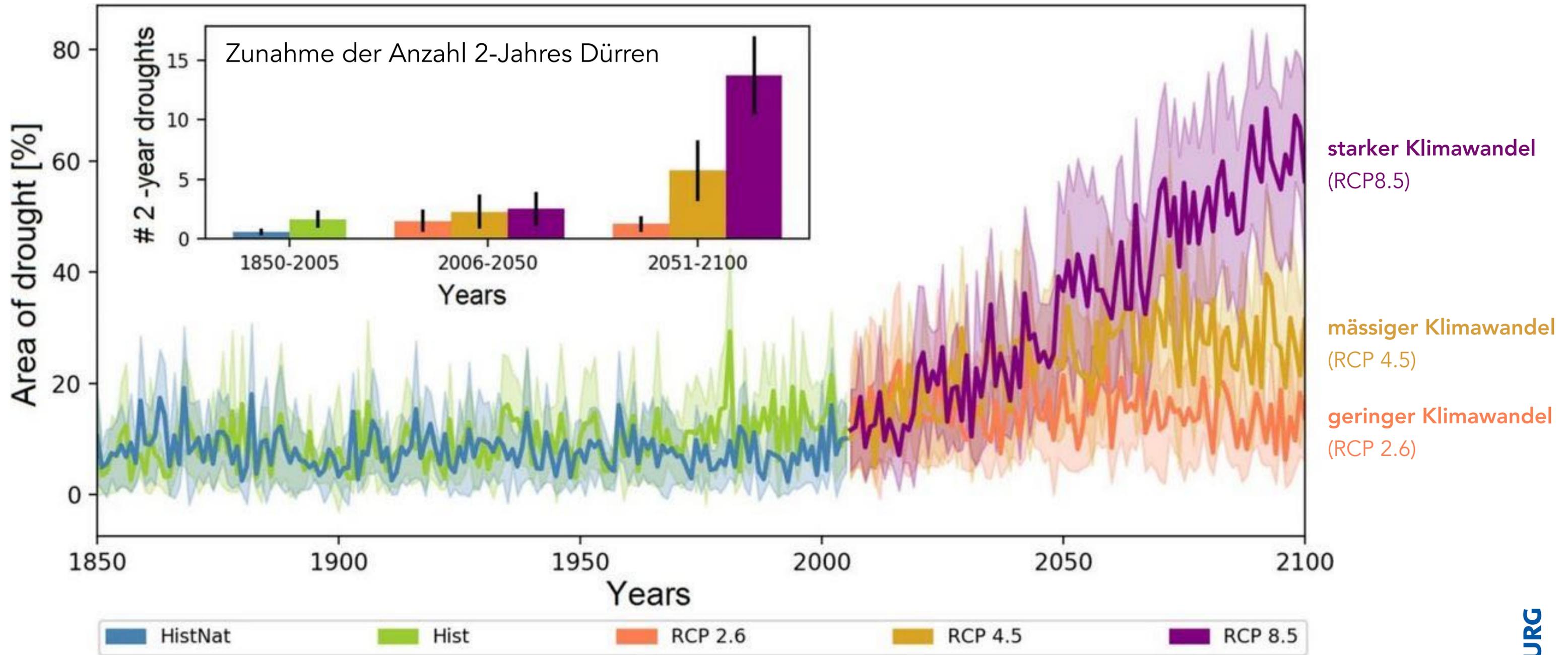
# Zunahme heißer Tage in Baden-Württemberg



# Abnahme des Sommerniederschlags



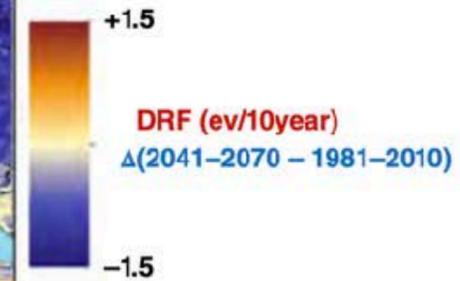
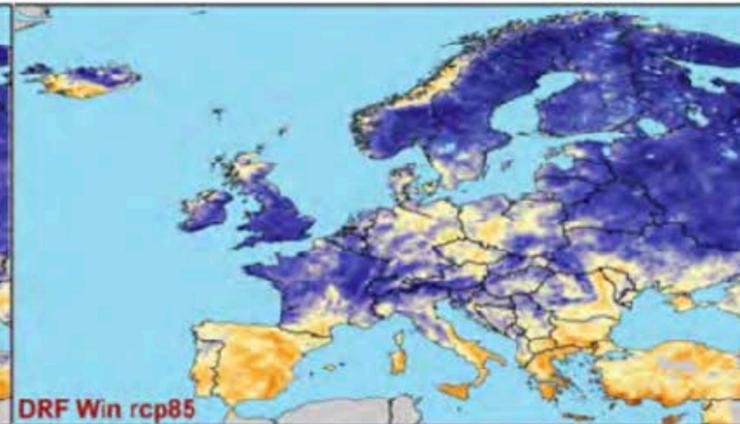
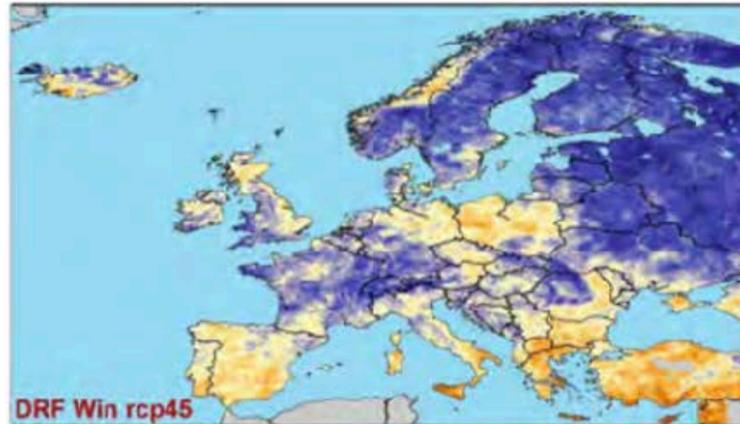
# Zunahme von Dürren in Mitteleuropa



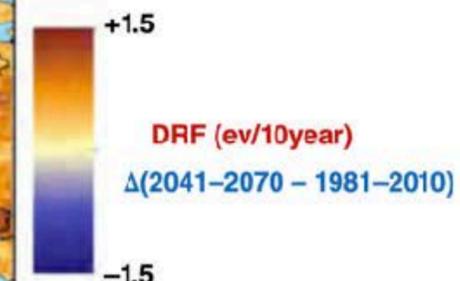
RCP4.5

RCP8.5

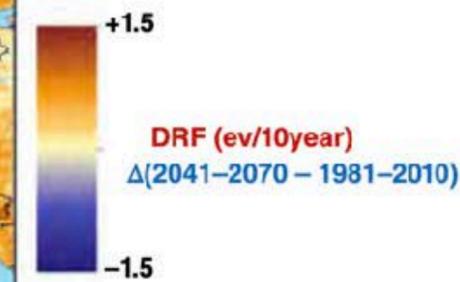
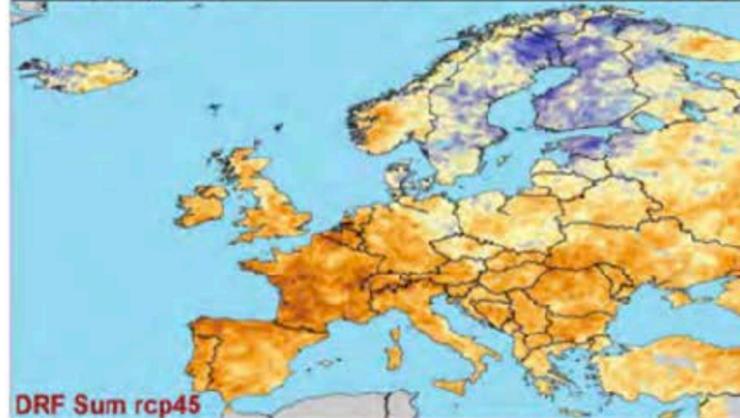
Winter



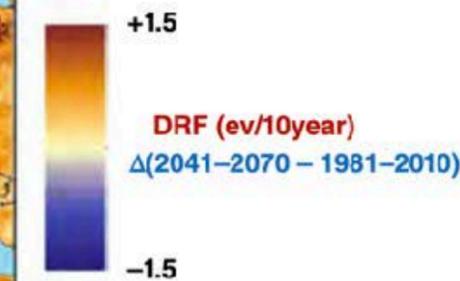
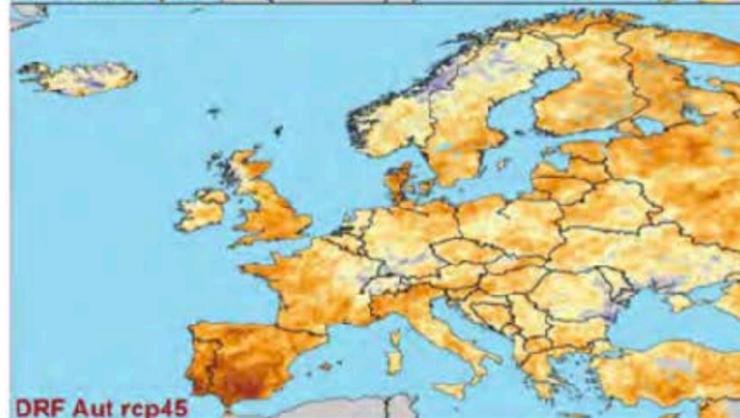
Frühling



Sommer



Herbst



Zunahme der Anzahl Dürren in Europa in der nahen Zukunft (2040 - 2070) relativ zu 1981 - 2010.

Quelle: Spinoni 2017

# Schicksal des Kohlendioxids?

Was geschah mit dem CO<sub>2</sub> welches im Zeitraum **2012-2021** pro Jahr emittiert wurde?

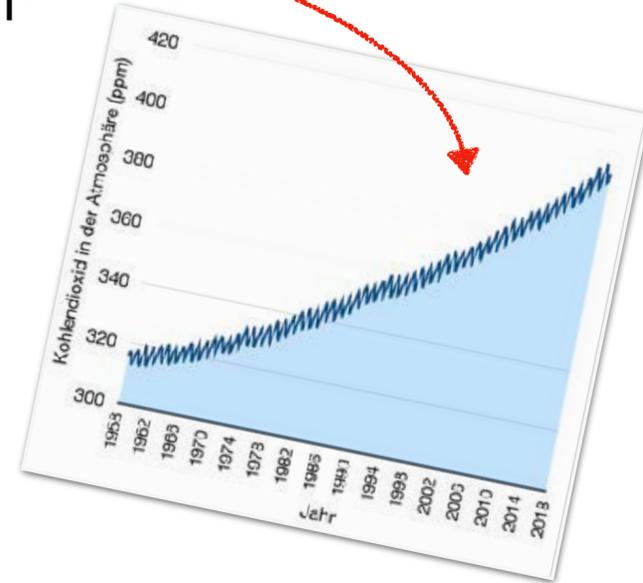
Menschliche Emissionen von CO<sub>2</sub>  
**100%**

39,7 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

Anreicherung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre

**48%**

19,1 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr



11,4 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

**29%**

Aufnahme durch Landpflanzen

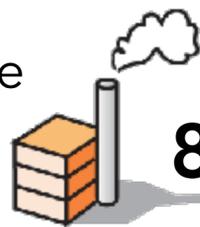
10,5 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

**26%**

Aufnahme durch Ozeane

Fossile Brennstoffe  
35,2 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

**89%**



**11%**

Landnutzung

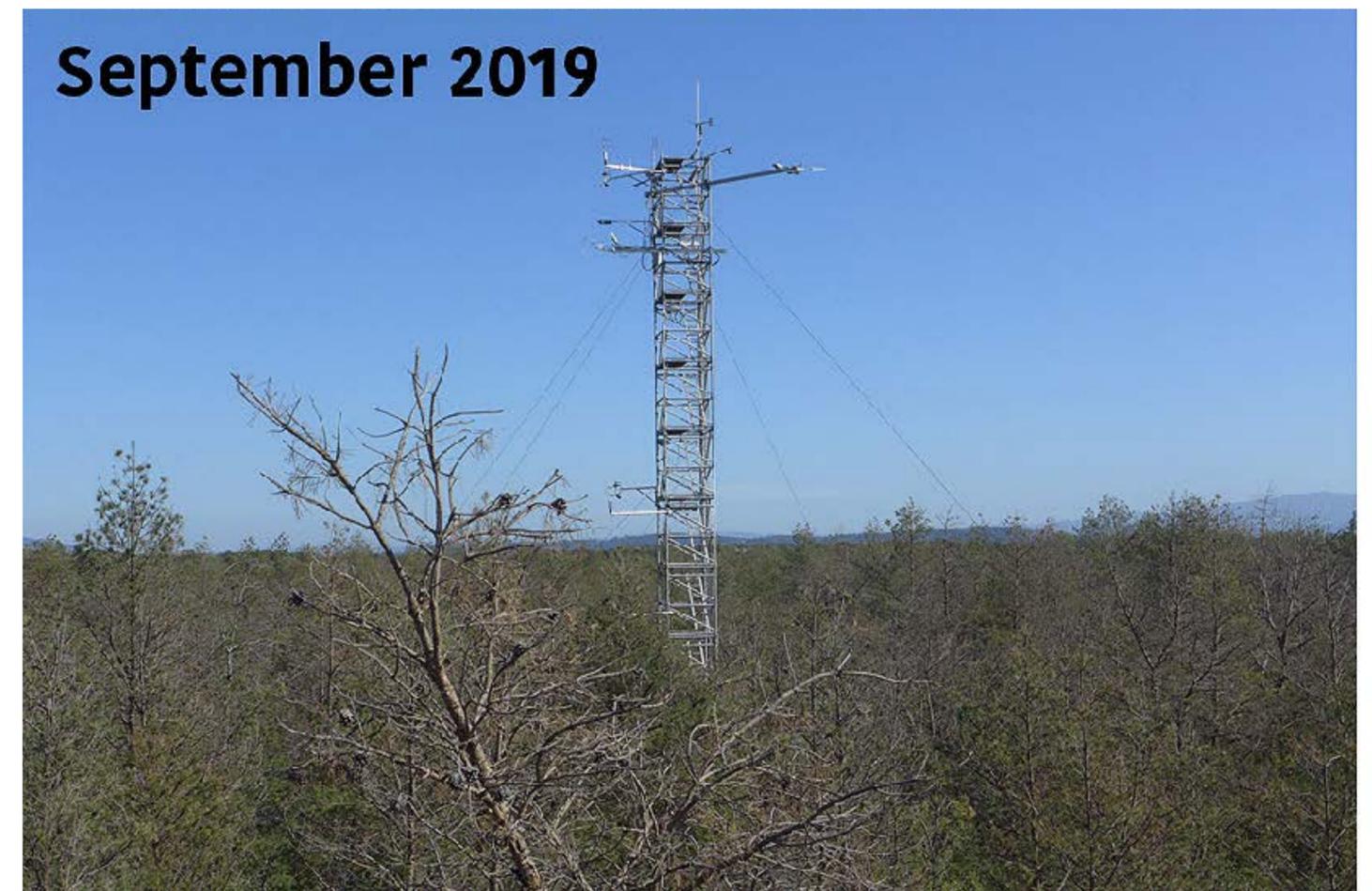
4,5 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

3% Unsicherheit -1.2 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr

# Wälder sind wichtige Senke für CO<sub>2</sub>



# Trockenheit und Kohlenstoffbudget



Messturm im Hartheimer Forst am Rhein der Uni Freiburg

Haberstroh S, Werner C, Grün M, Kreuzwieser J, Seifert T, Schindler D, Christen A, 2022: Central European 2018 hot drought shifts Scots Pine forest to its tipping point. *Plant Biology*, 24, 1186-1197.

Prof. Dr. Andreas Christen  
42. Freiburger Winterkolloquium Forst und Holz  
Trockenheit und Dürre heute und morgen

An aerial photograph of a forest. A tall, silver meteorological measurement station tower is visible on the left side. The forest consists of many trees, some of which are dead or dying, appearing as light brown or grey against the green foliage. The text is overlaid on a semi-transparent dark grey box in the upper right quadrant.

Die Dürre von 2018 führte, zusammen mit den vorangegangenen heißen Jahren 2014 und 2015, zu einem massiven beschleunigten Baumsterben in Kiefernwäldern der Oberrheinebene. An unserer Messstation in Hartheim waren bis September 2019 etwa 23 %, bis September 2020 etwa 47 % aller Kiefern abgestorben (n = 368)



(Photo: A. Christen, Uni Freiburg)

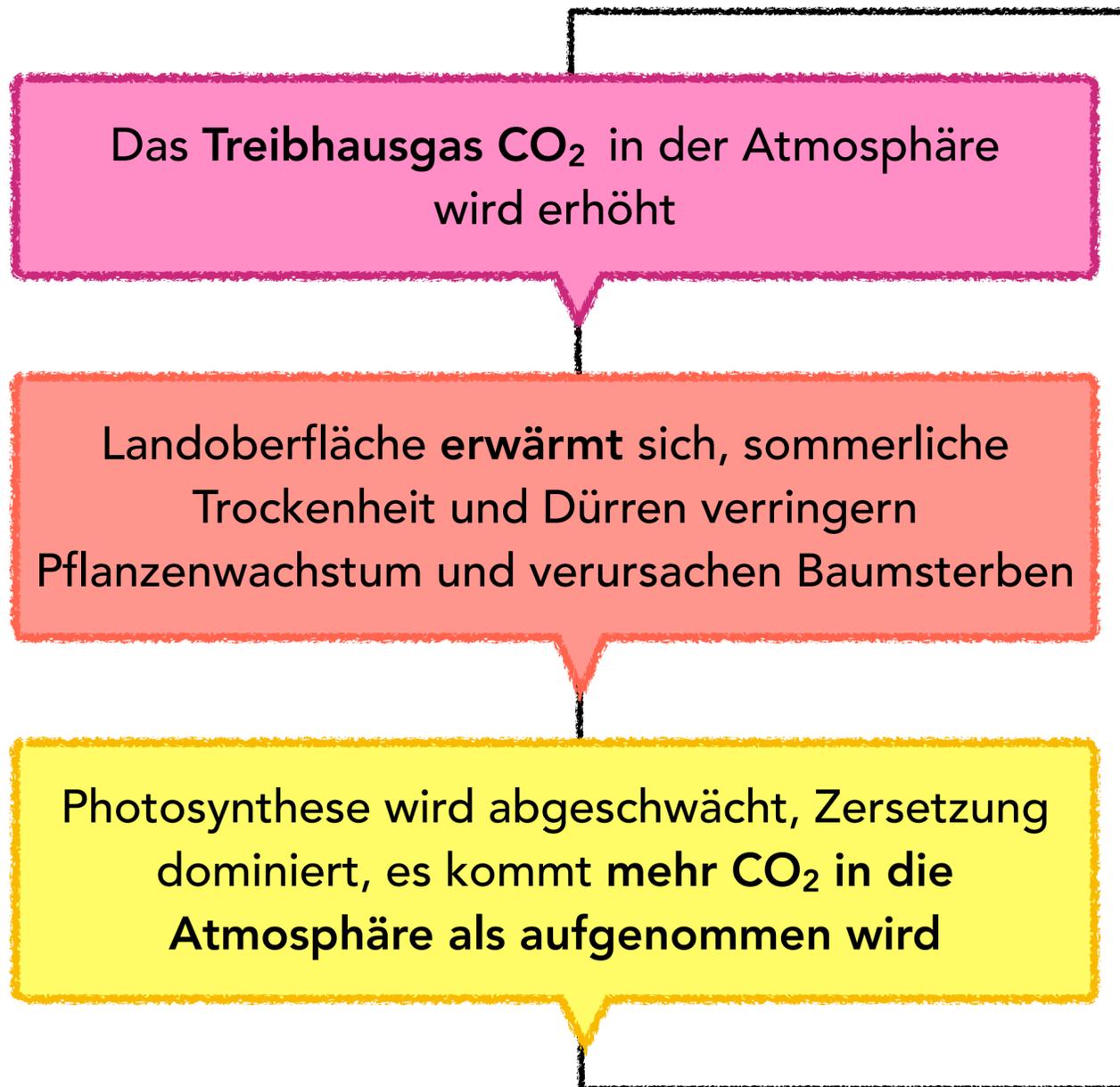
ICOS

INTEGRATED  
CARBON  
OBSERVATION  
SYSTEM

UNI  
FREIBURG



# Positive Rückkoppelung im Klimasystem



Dieser Wechsel des Waldökosystems von Senke zu Quelle führt dazu, dass weiteres CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangen wird, was wir eine **positive Rückkoppelung** nennen.

Wenn sich diese Veränderungen grossflächig abzeichnen, wird der **Klimawandel wahrscheinlich schneller voranschreiten**, als dies derzeit von Modellen des Klimasystems projiziert wird.



Die Antwort - **Grossflächige Abholzung** der der toten Bäume. Problem: Weitere Neuanpflanzungen zu 70% abgestorben.



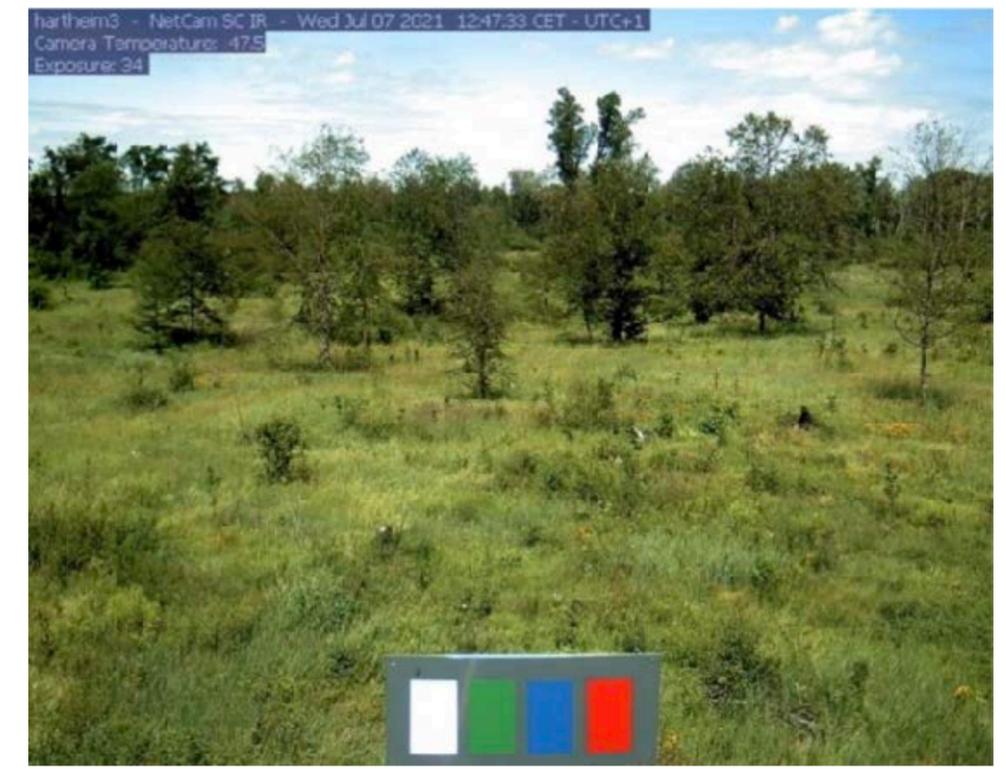
# Vegetationsänderungen

Automatische Phenocam-Bilder Hartheimer Wald Juli 2021

## Dürre-geschädigter Wald



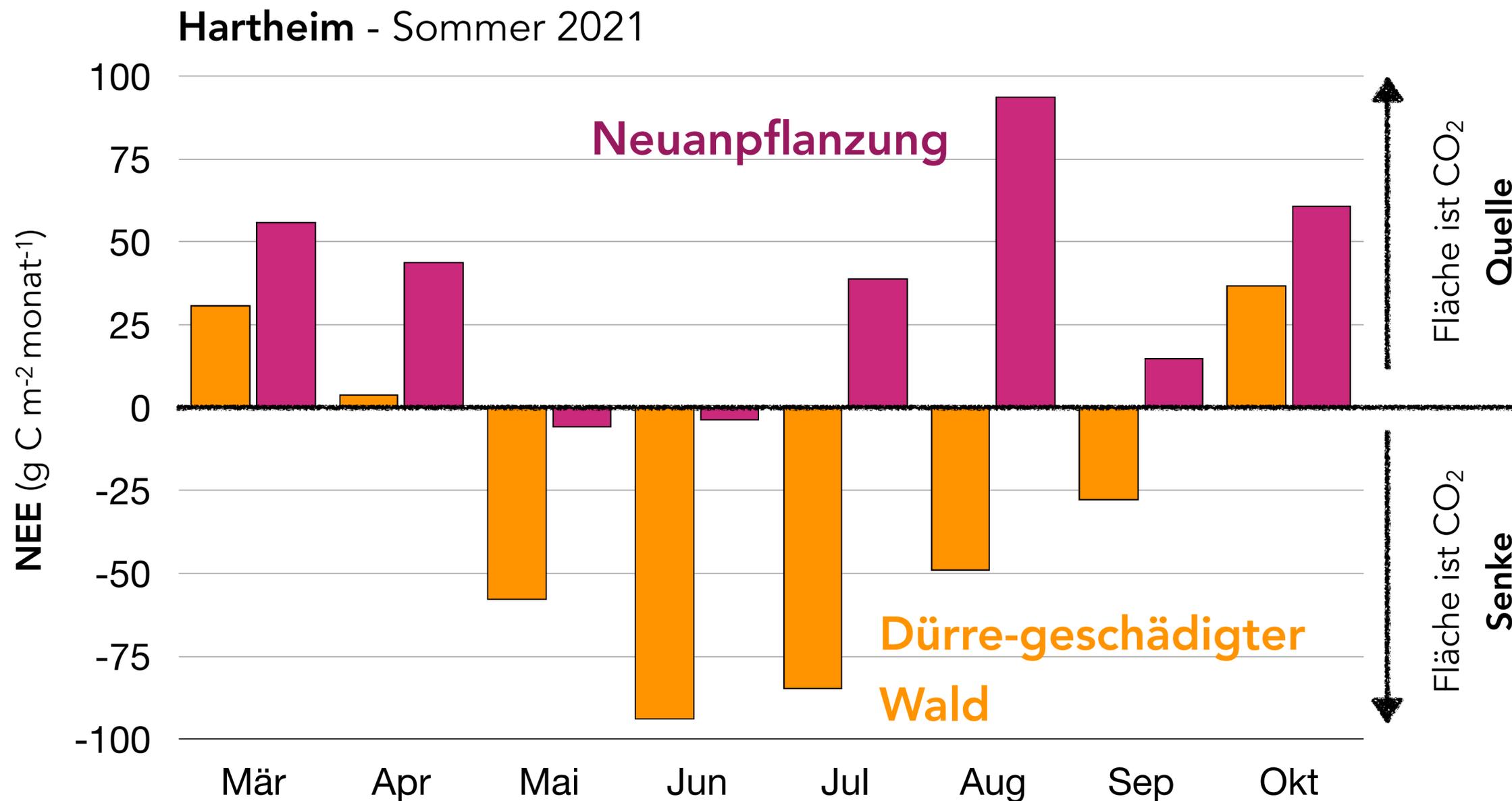
## Neuanpflanzung



<https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/sites/harthem1/>

Prof. Dr. Andreas Christen  
42. Freiburger Winterkolloquium Forst und Holz  
Trockenheit und Dürre heute und morgen

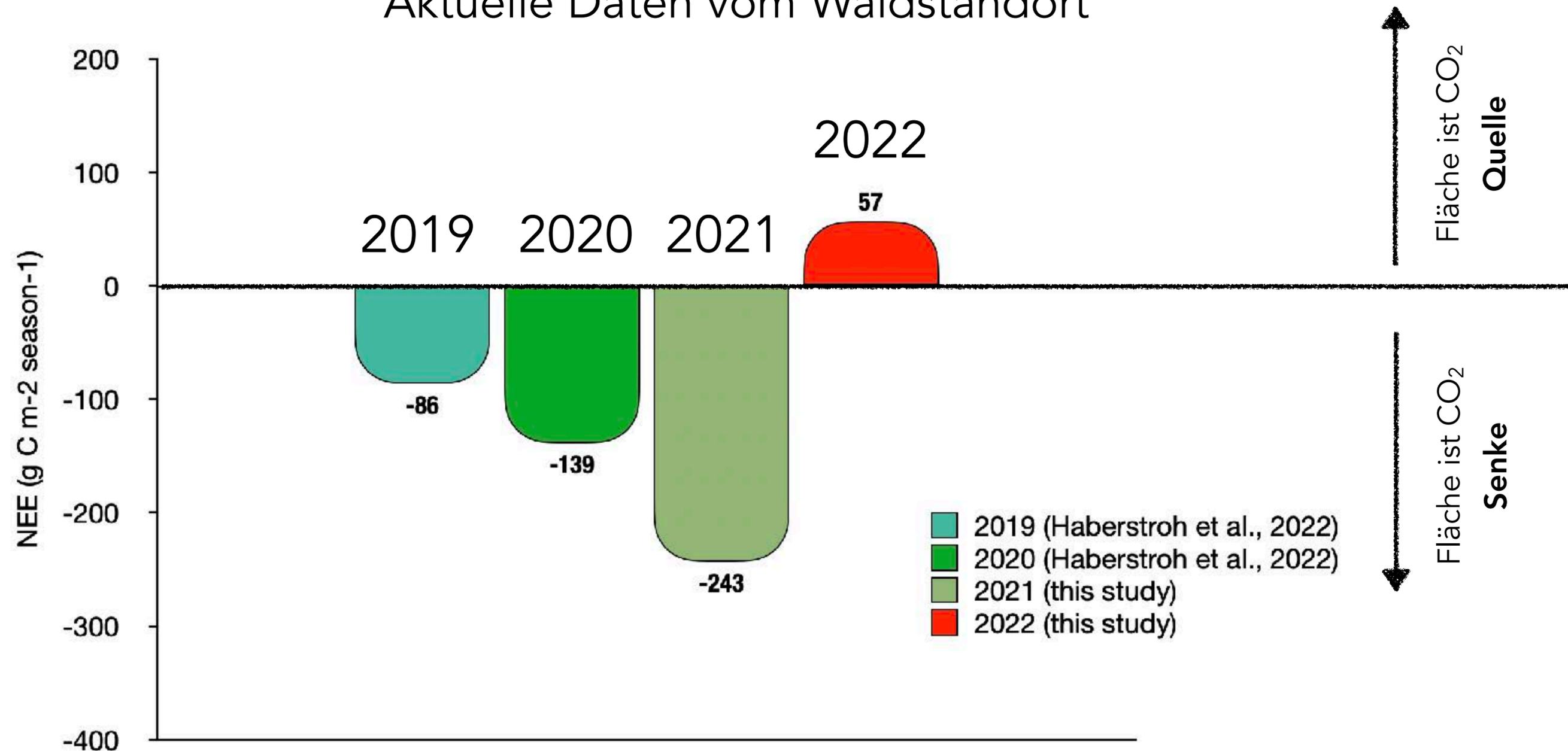
# Vergleich der CO<sub>2</sub> Bilanz der zwei Flächen



Im Sommerhalbjahr 2021 hat der trockenengeschädigte Wald  $-318 \text{ g C m}^{-2}$  aufgenommen, die Neuanpflanzung war eine CO<sub>2</sub>-Quelle mit  $+183 \text{ g C m}^{-2}$

# Der Wald war eine Quelle im Sommer 2022!

Aktuelle Daten vom Waldstandort



# Zusammenfassung

- Das Auftreten von sommerlicher **Hitze, Trockenheit** und **Dürren** hat in **Mitteleuropa** in den letzten Jahren **klar zugenommen**.
- **Dürren und Hitzewellen verstärken sich gegenseitig**. Die Austrocknung erwärmt die Atmosphäre, Hitze verstärkt die Austrocknung.
- Regionale Klimaprojektionen zeigen, dass Dürren und Hitzewellen in Mitteleuropa **im Laufe des 21. Jahrhunderts weiter zunehmen** werden, also häufiger, flächenmässig mehr vorkommen und intensiver werden.
- Wälder können Kipppunkte im Klimasystem werden: Aufgrund von Dürreschäden wird **weniger Kohlendioxid** aus der Atmosphäre aufgenommen, im Extremfall werden sogar weitere Emissionen erzeugt, was den **Klimawandel weiter verstärkt**