

St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft

# Der Globale Kohlenstoffkreislauf

6 November 2024

Fortunat Joos

Klima- und Umweltphysik und Oeschger Zentrum für Klimaforschung

Universität Bern

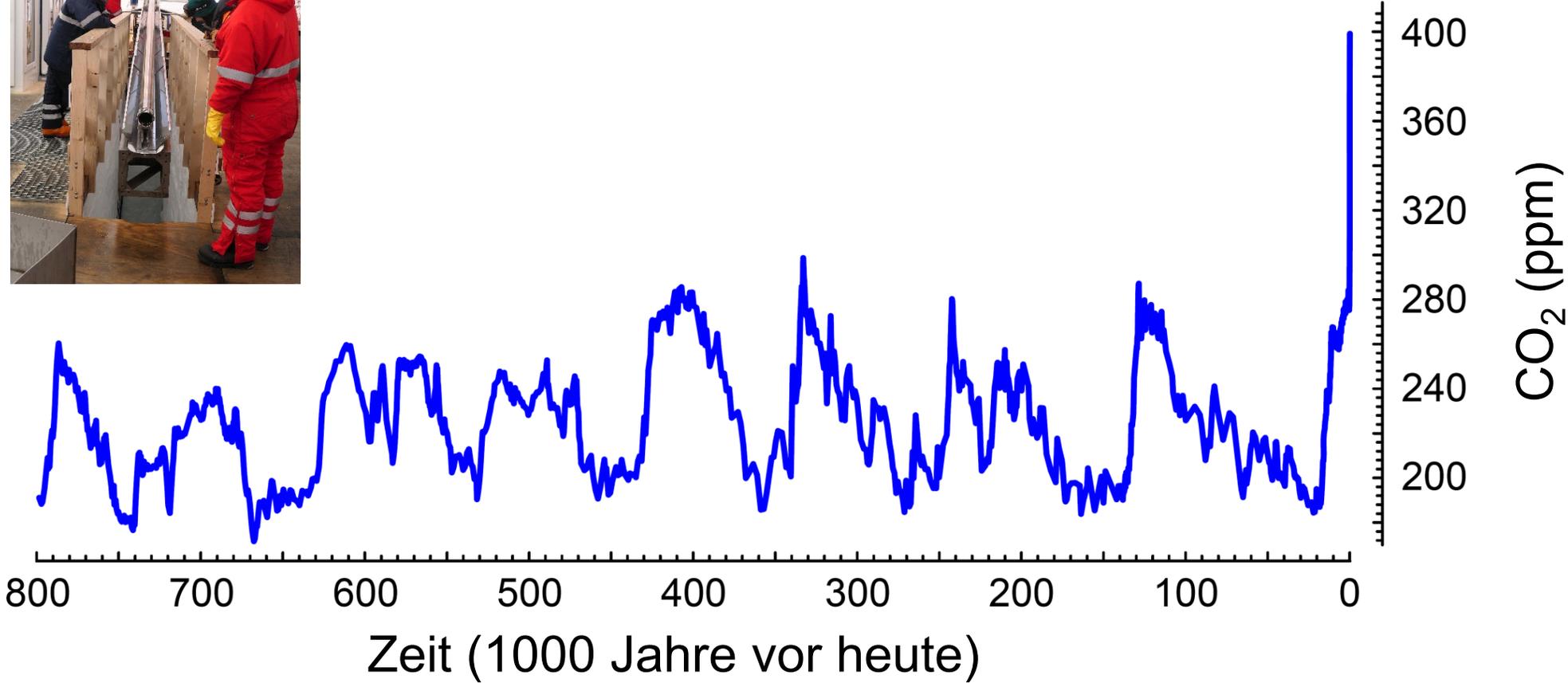
[fortunat.joos@unibe.ch](mailto:fortunat.joos@unibe.ch)

# Das Anthropozän: Beispiellos

# Beispiellos: CO<sub>2</sub> der letzten 800'000 Jahre

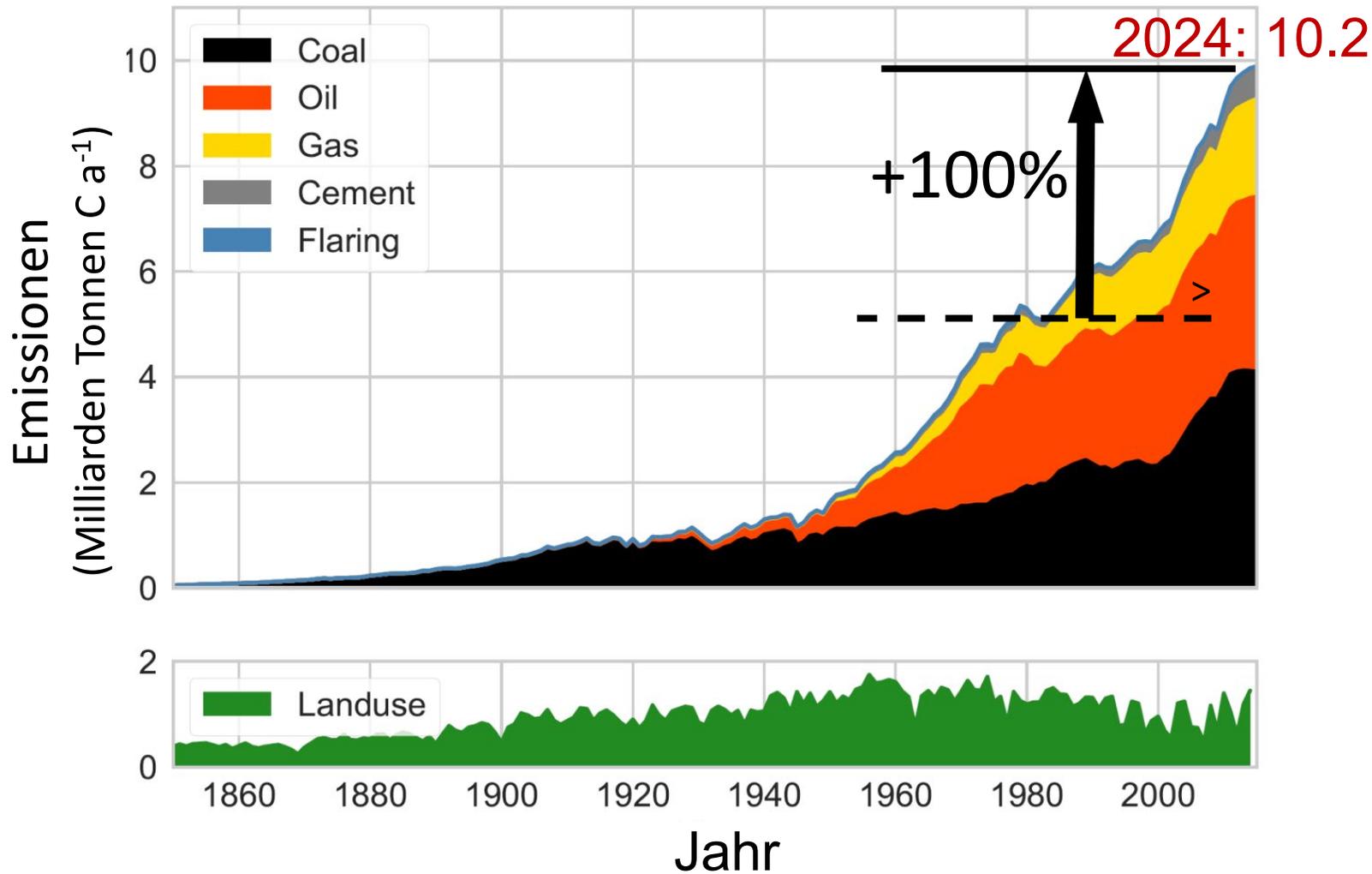


**2024** **422 ppm**



(Lüthi et al., 2008, NOAA)

# Beispiellos: Globale CO<sub>2</sub> Emissionen



(Boden et al., CDIAC; Lienert and Joos, 2018; CICERO, 2024)



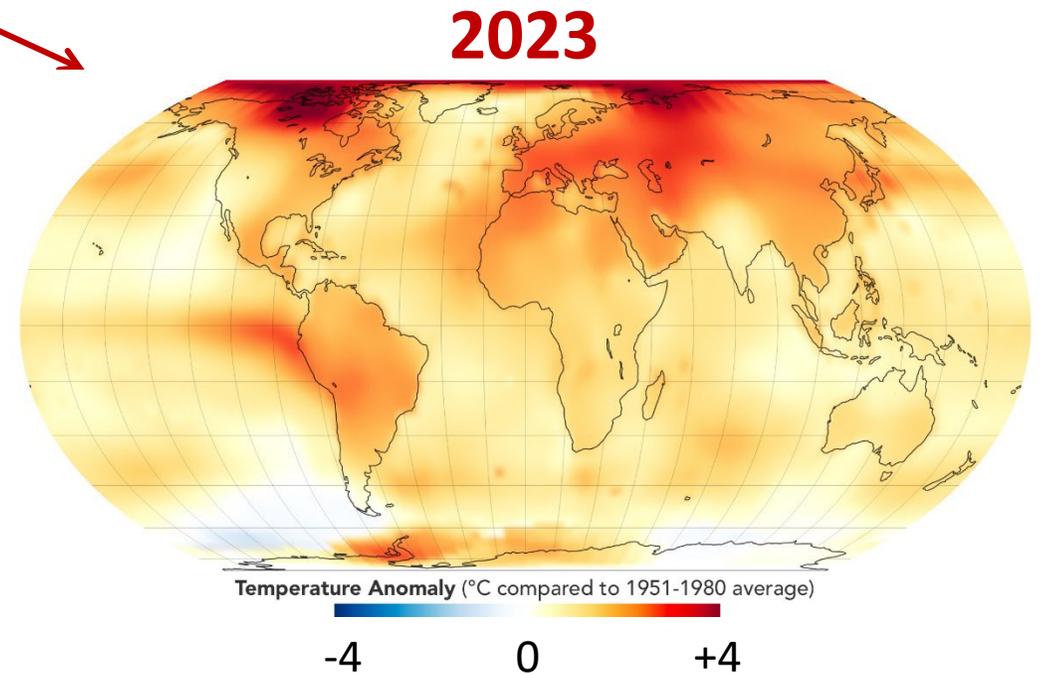
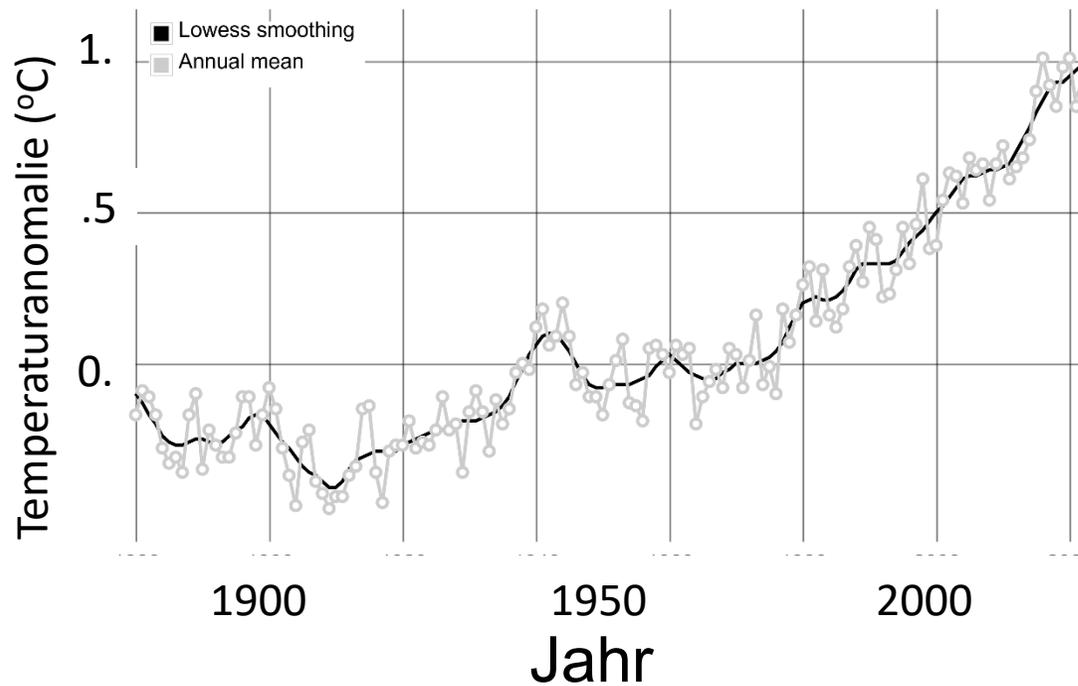
Land Nutzung:  
~ 10% der  
heutigen CO<sub>2</sub>  
Emissionen

# Die Erhitzung geht weiter



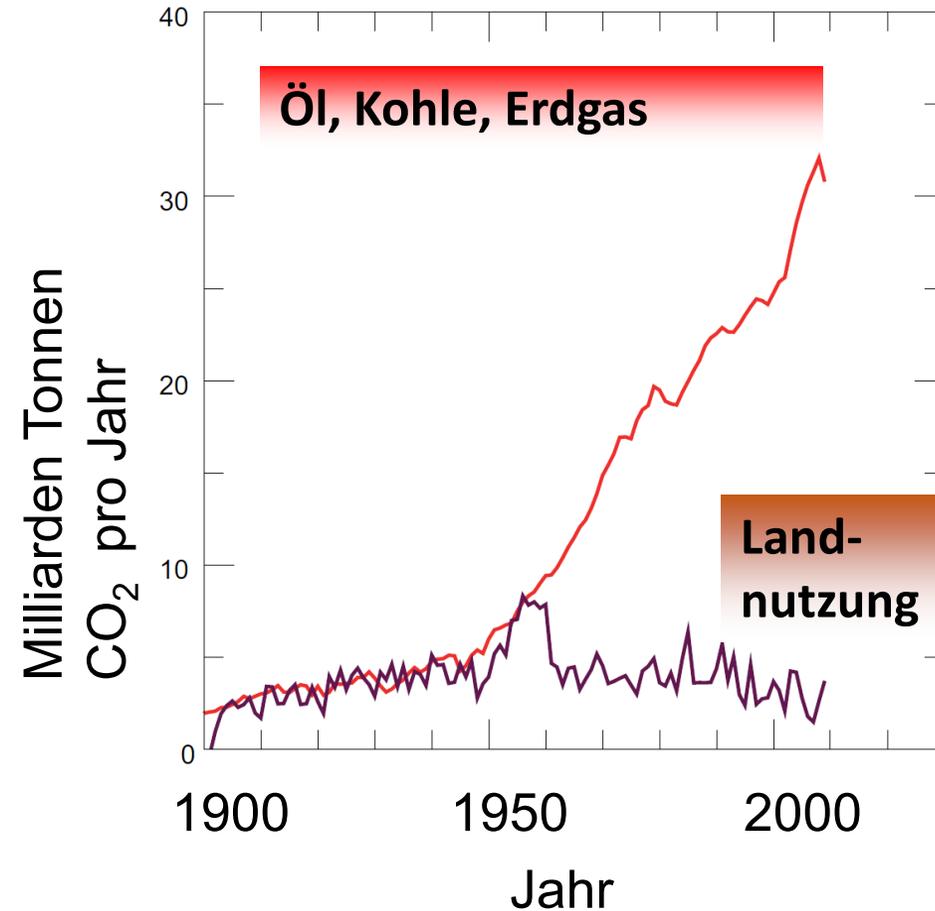
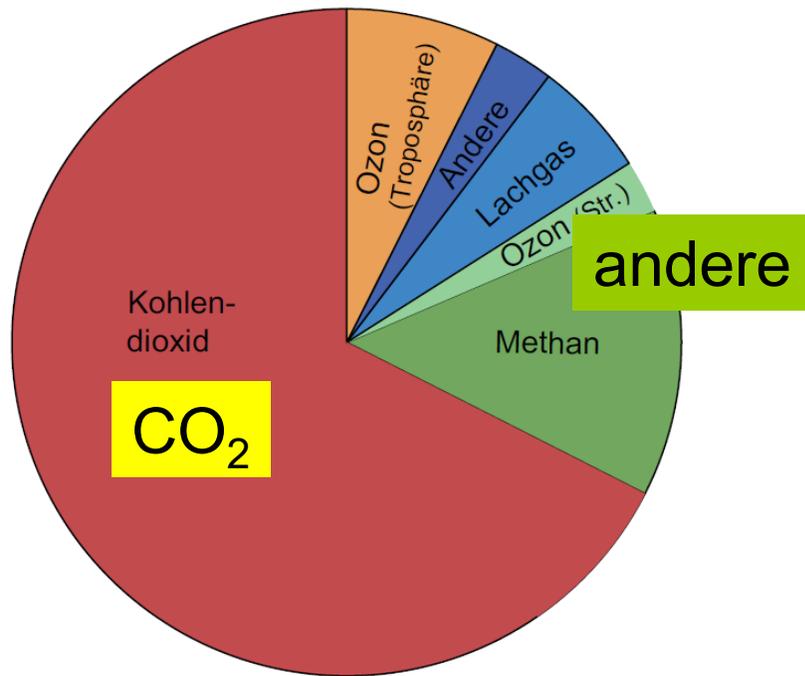
Valencia, Okt. 2024 (Quelle: Newsflix)

# Temperaturanomalien (relativ zu 1951-1980)



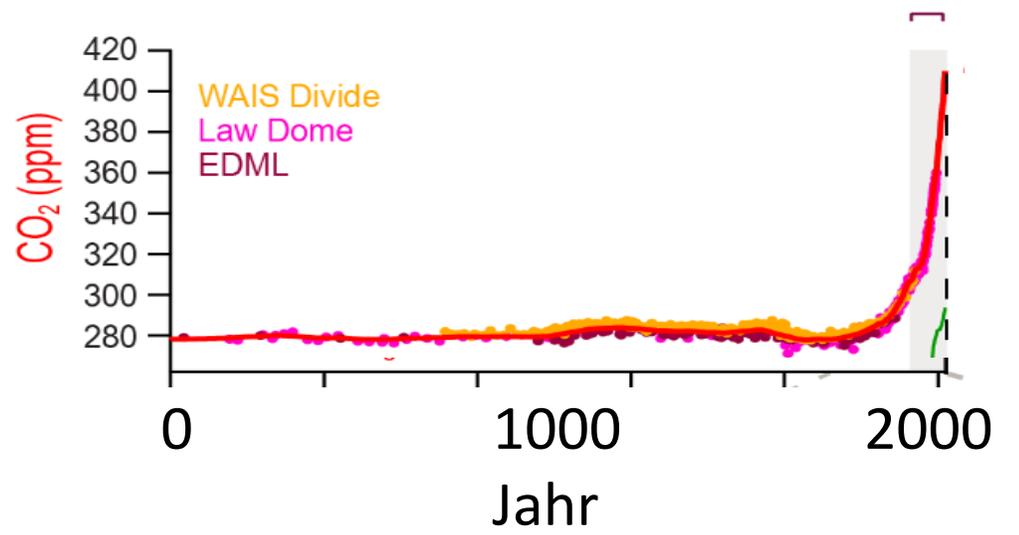
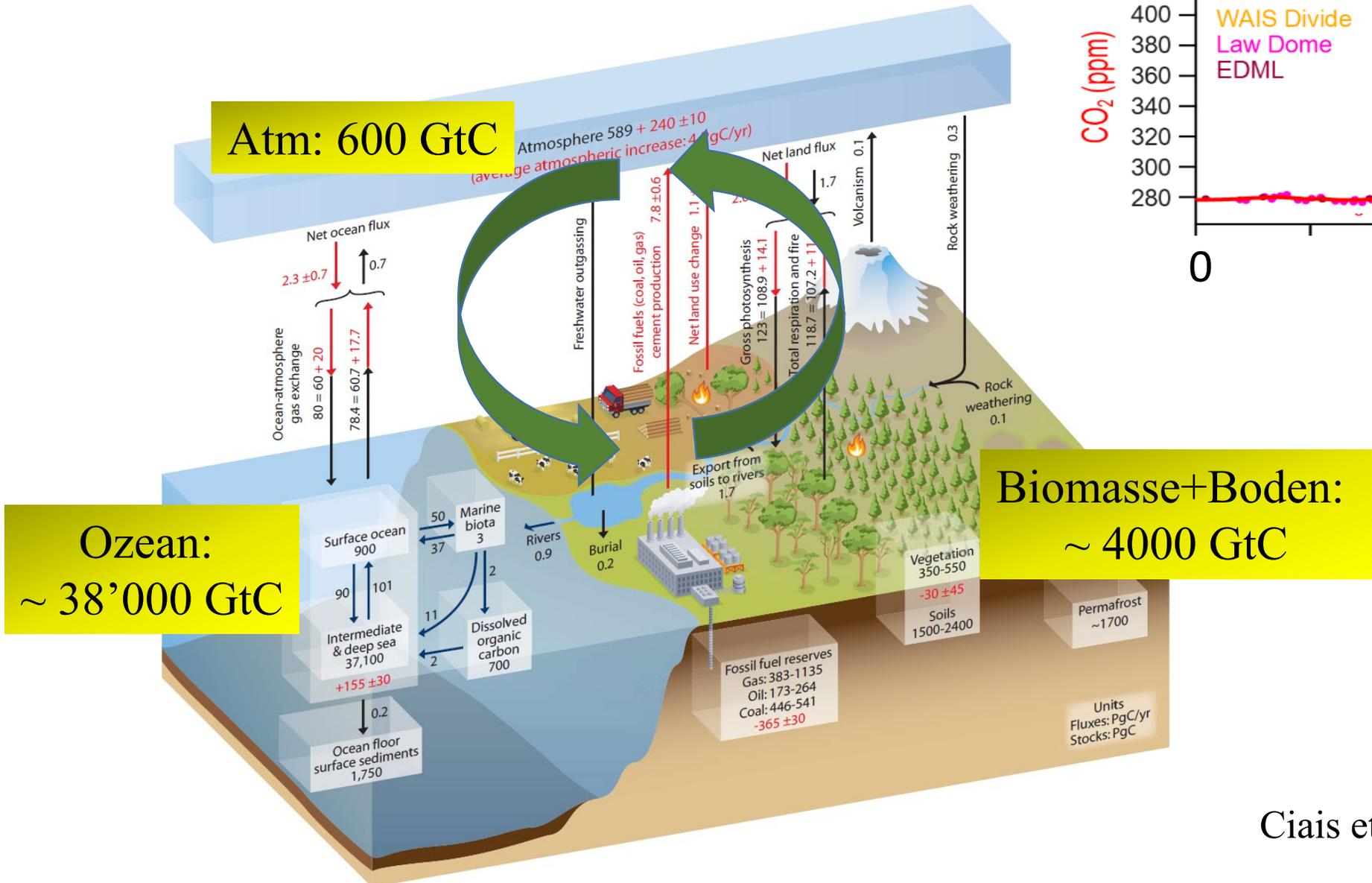
# CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen dominiert die Erwärmung

Beitrag zur Temperaturänderung (2100)

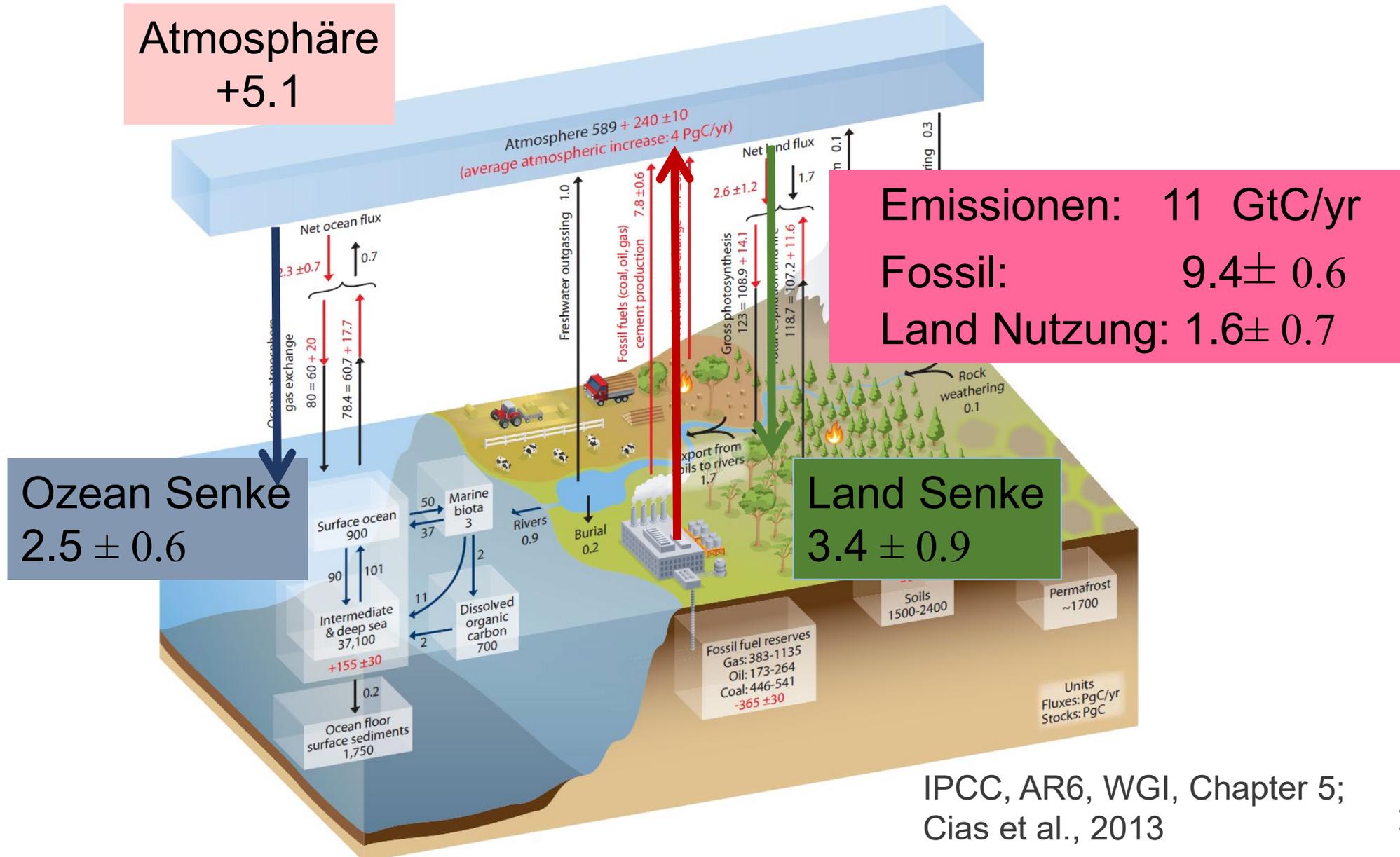


Wohin geht das CO<sub>2</sub>?

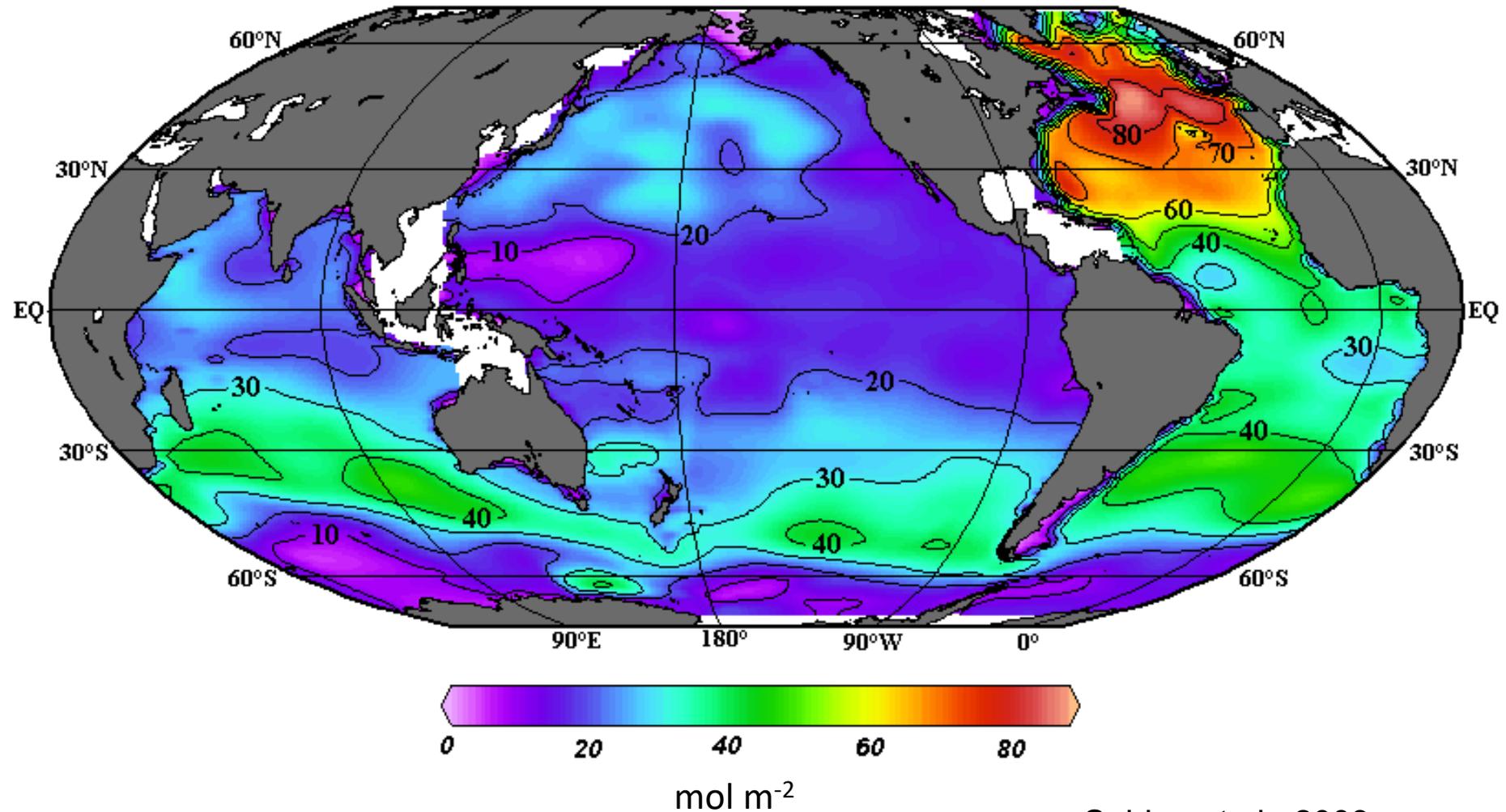
# Der globale Kohlenstoffkreislauf im vorindustriellen Gleichgewicht



# Die Verteilung des anthropogenen Kohlenstoffs (2010-2019; GtC yr<sup>-1</sup> bzw Milliarden Tonnen C pro Jahr)



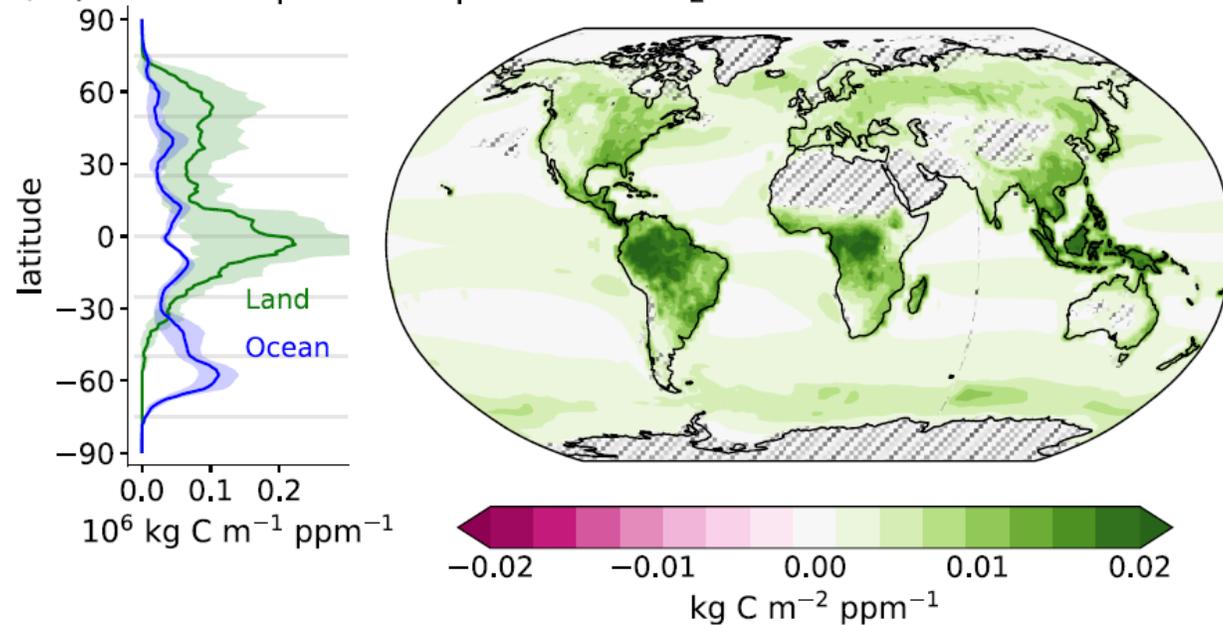
# Zunahme an Kohlenstoff aus Beobachtungen



Sabine et al., 2003

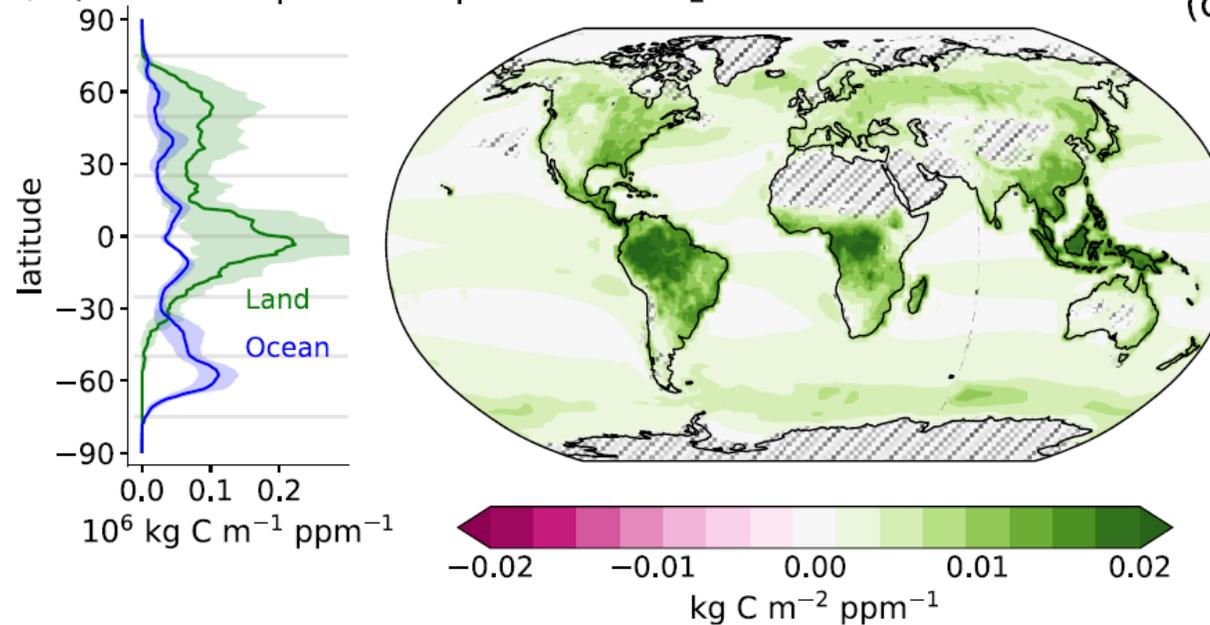
# Sensitivität der Senken auf steigendes CO<sub>2</sub>

(a, b) Carbon uptake response to CO<sub>2</sub>

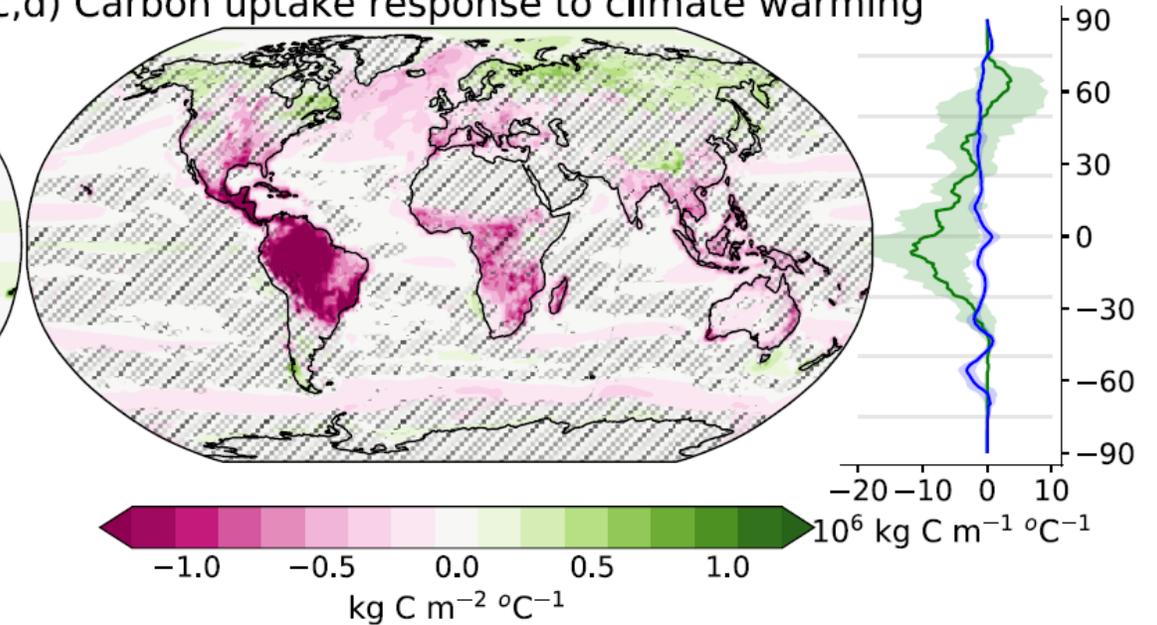


# Sensitivität der Senken auf steigendes CO<sub>2</sub> und die Erwärmung

(a, b) Carbon uptake response to CO<sub>2</sub>



(c,d) Carbon uptake response to climate warming



IPCC, AR6, WGI, Box TS.5

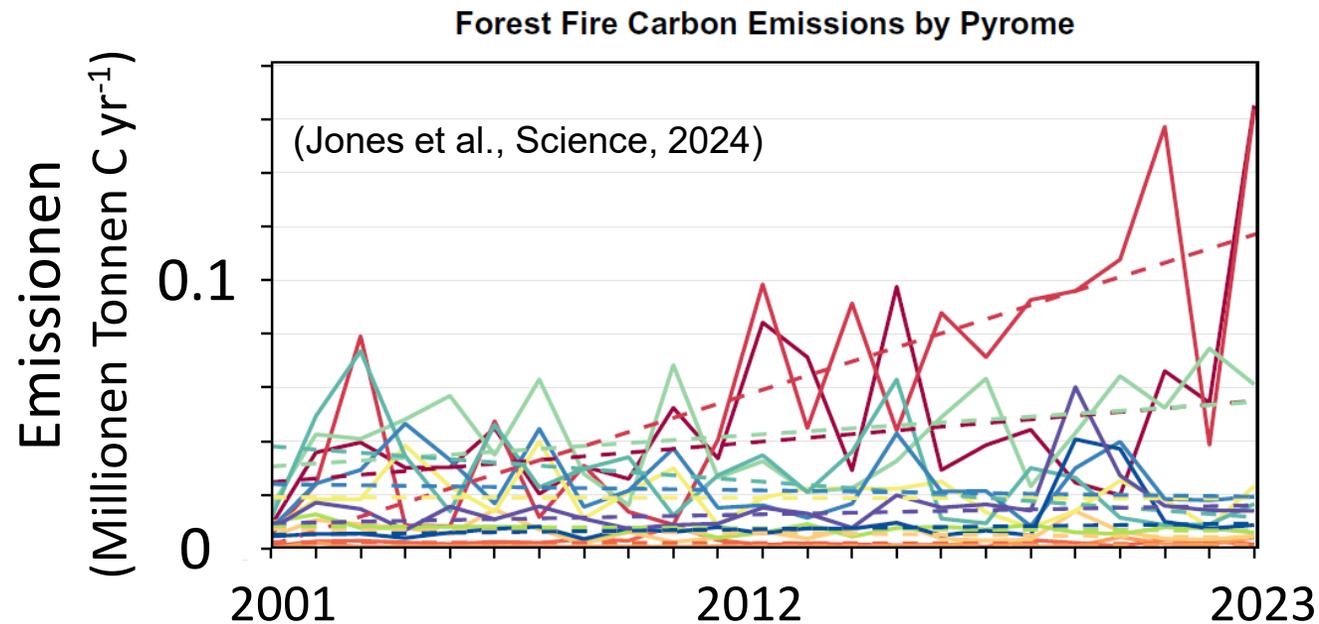
# Globale CO<sub>2</sub> Emissionen von Waldbränden: +60% seit 2001



Photo: Stefan Doerr

Feuer sind Teil des natürlichen CO<sub>2</sub> Kreislaufes und tragen ~3% zum CO<sub>2</sub> Rückfluss vom Land an die Atmosphäre bei.

Entsprechen ~ 20% der fossilen Emissionen



Die Klimaerwärmung begünstigt Waldbrände und führt zu mehr CO<sub>2</sub> Emissionen.



Earth seen from  
Galileo Space craft  
(source JPL, NASA)

*How inappropriate to call this planet  
Earth when it is clearly Ocean.*

- Arthur C. Clarke



Earth seen from  
Galileo Space craft  
(source JPL, NASA)

### Dienste des Ozeans:

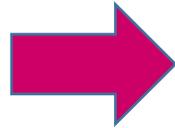
- CO<sub>2</sub> Aufnahme
- Wärmeaufnahme
- Nahrung
- ..

### Risiken aus Kohle/Öl/Gas:

- Deoxygenation
- Acidification
- Erhitzung
- Meeresspiegelanstieg
- Extreme Ereignisse
- ..

# Aufnahme von anthropogenem CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> Emissionen



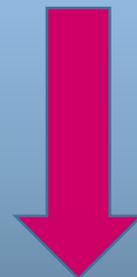
Atmosphärische CO<sub>2</sub> Zunahme



Air-to-sea flux

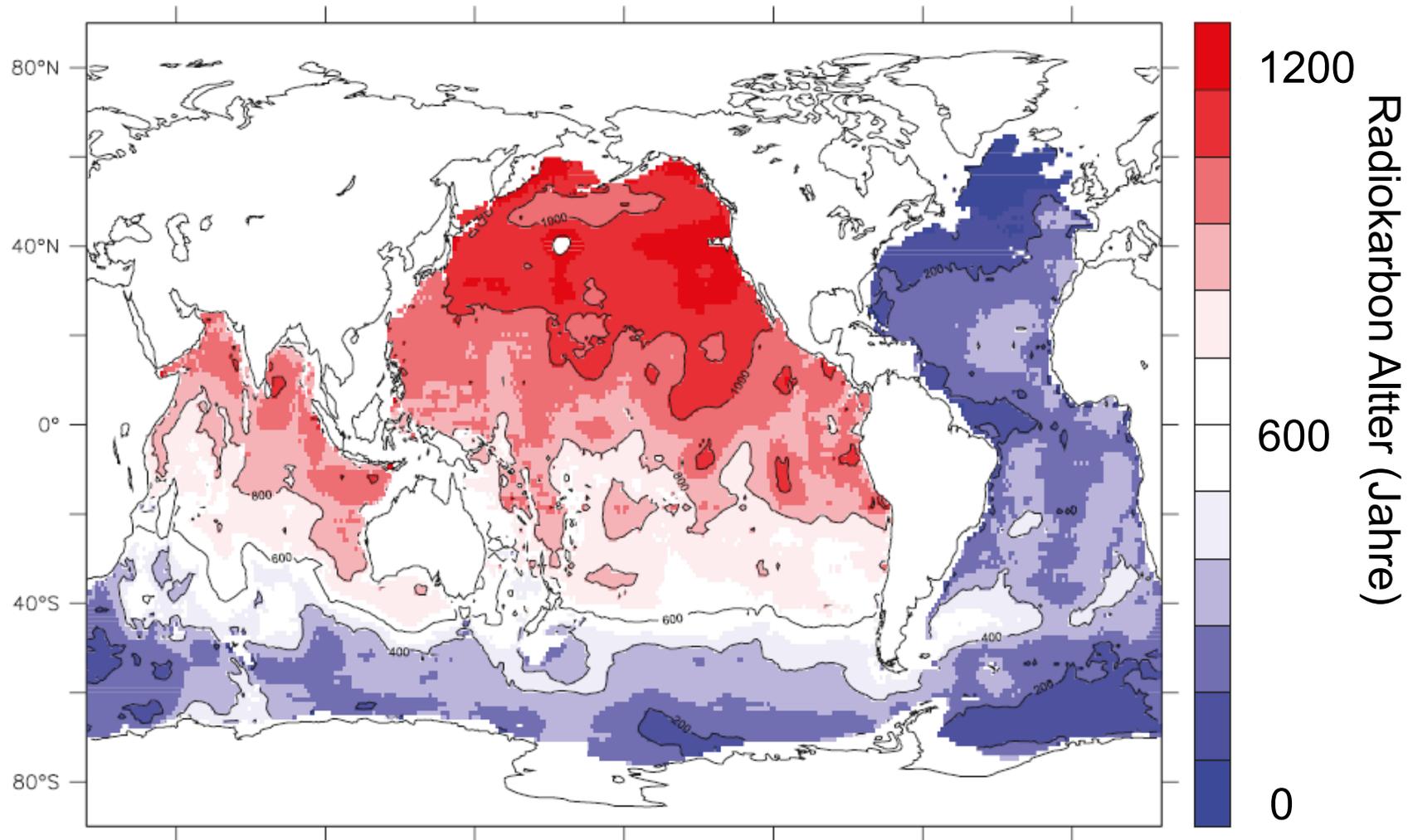


Climate feedbacks:  
climate-driven changes  
in solubility, sea ice,  
circulation, biology



Transport  
von zusätzlichem C  
in die Tiefe

# Transport in die Tiefe dauert Jahrhunderte Radiokarbon Alter unterhalb von 1500 m



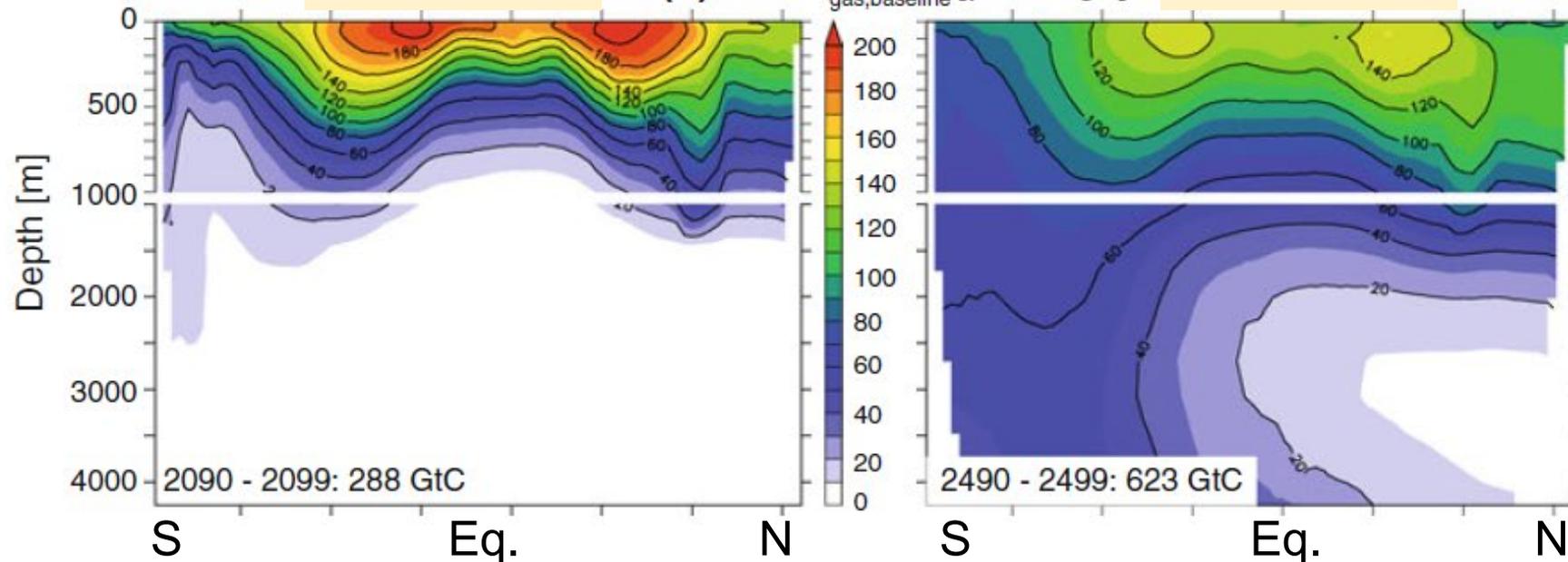
# Die CO<sub>2</sub> Störung wird nur langsam vom Ozean aufgenommen und bleibt über Jahrtausende

Anthropogener Kohlenstoff

2100 AD

(a)  $\Delta sDIC_{\text{gas,baseline}}$  [ $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ]

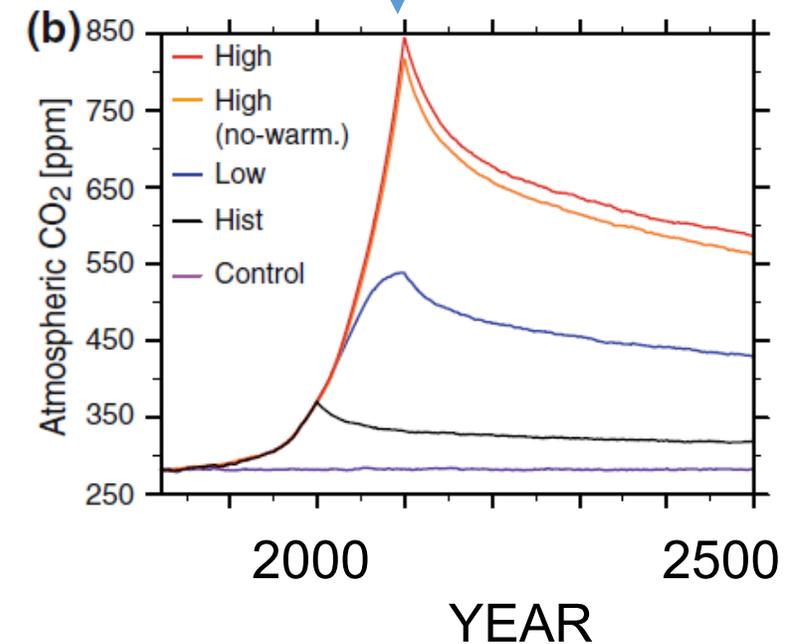
2500 AD



Pazifik,  $\Delta DIC$  [ $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ]

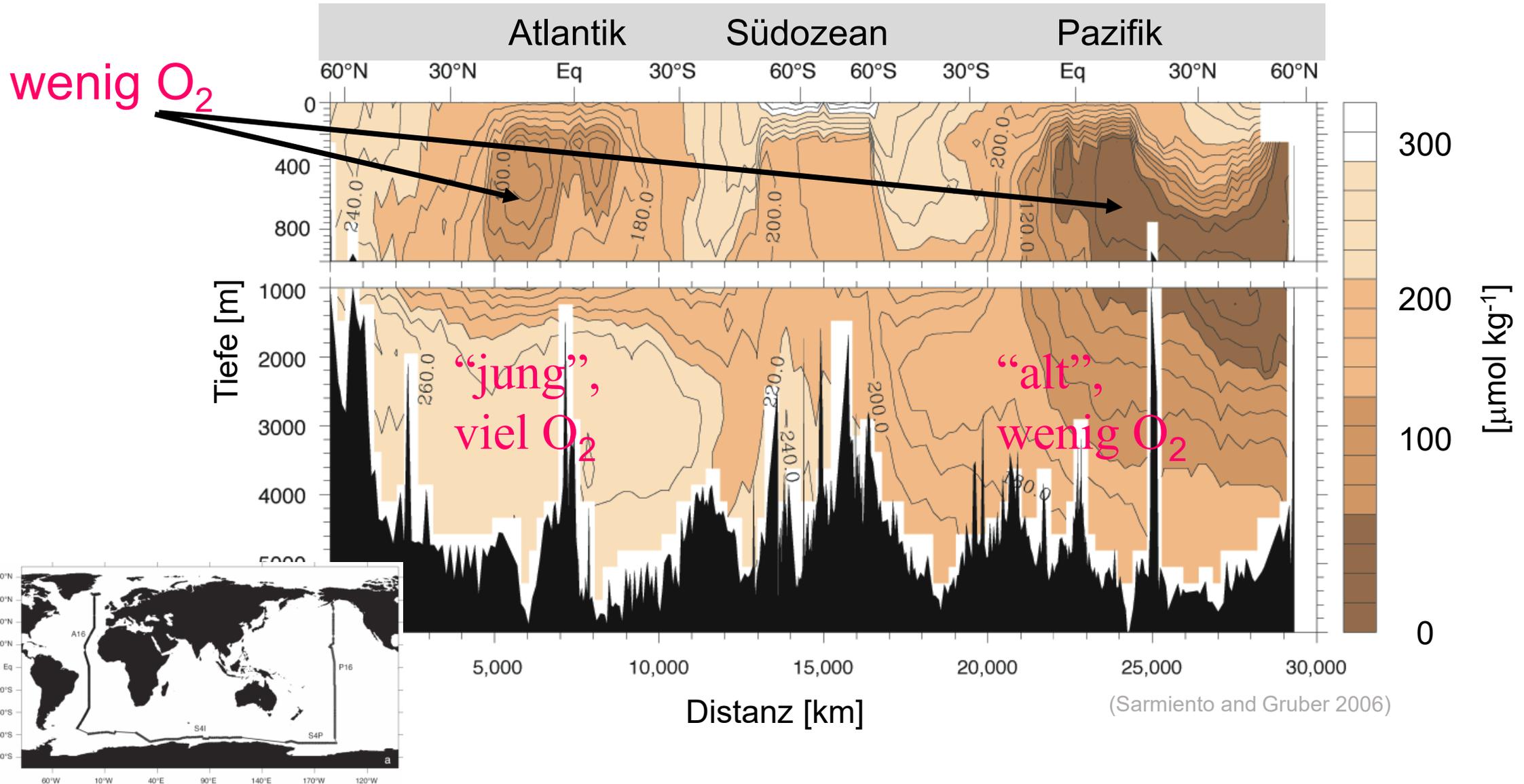
Atm. CO<sub>2</sub>

Stopp der Emissionen



# Ocean deoxygenation: Der Sauerstoff im Ozean nimmt ab

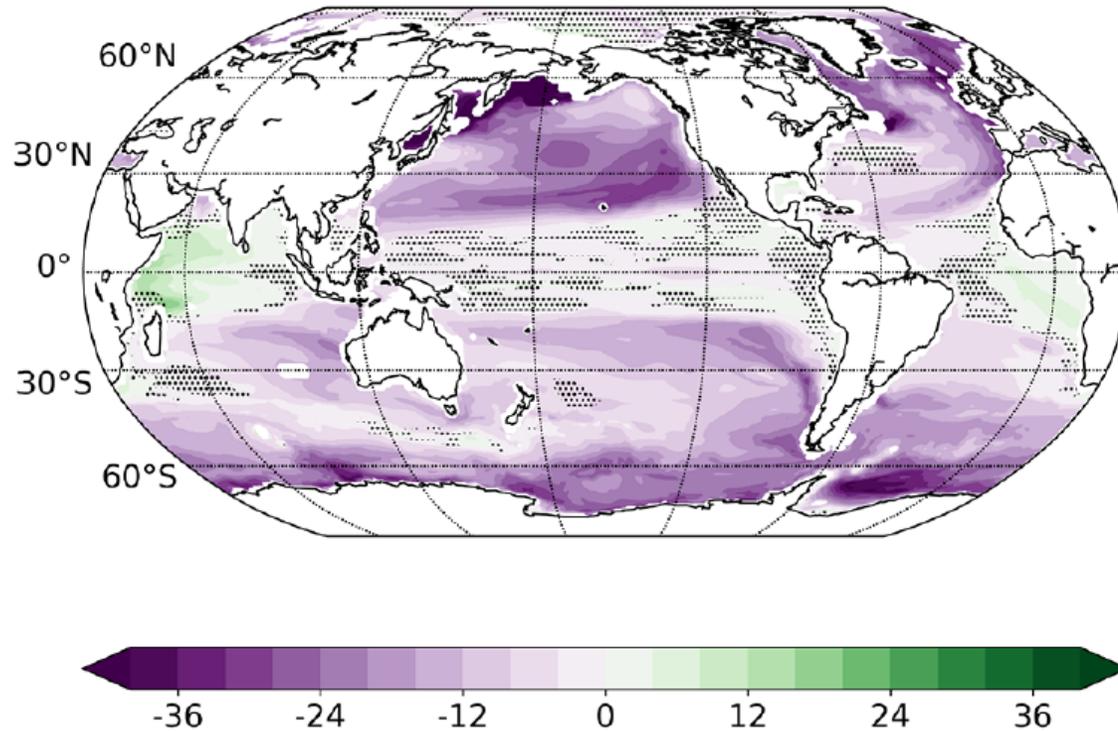
# Beobachtete Sauerstoffverteilung: O<sub>2</sub> wird in der Tiefe durch die Zersetzung von organischem Material vermindert



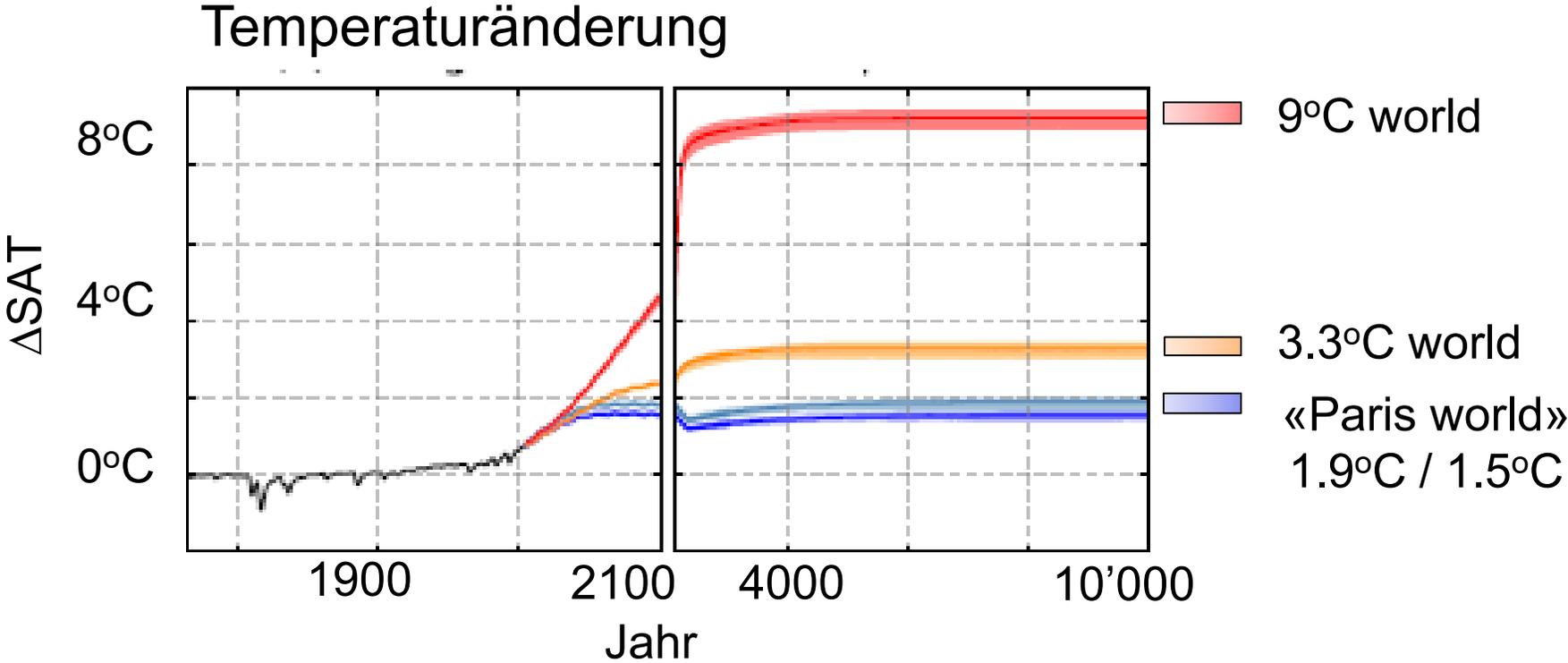
# $\Delta O_2$ in der Thermokline (200-600 m)

Earth System Model simulations from 1860 to 2100

(b) Multi-model median of  $\Delta O_2$  [ $\text{mmol m}^{-3}$ ]

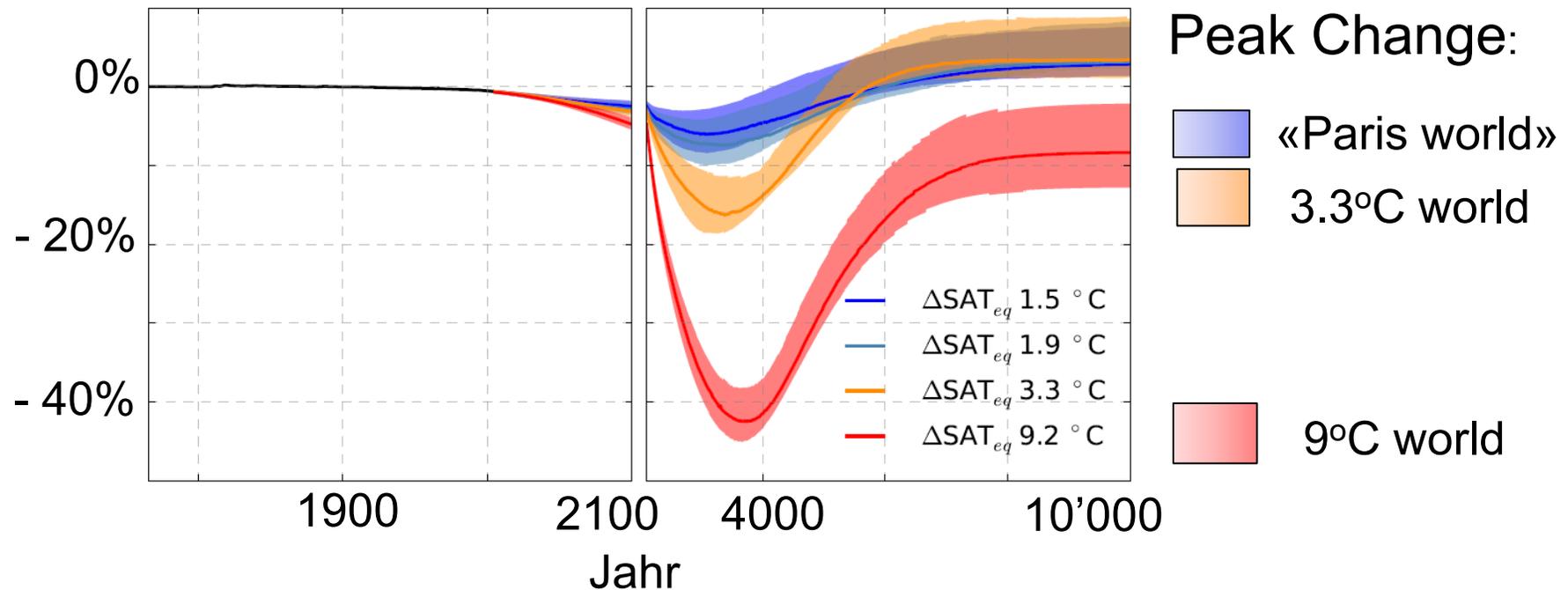


# Lang-andauernde Veränderungen Simulationen über die nächsten 10'000 Jahre



- Sauerstoffinventar nimmt bis zu 40% ab
- Maximum der Deoxygenation ist 1'000 Jahre nach der Stabilisierung der Treibhausgase
- Die Situation verschlimmert sich noch lange nachdem die Erwärmung gestoppt wurde

## Änderung des O<sub>2</sub> Inventars des Ozeans

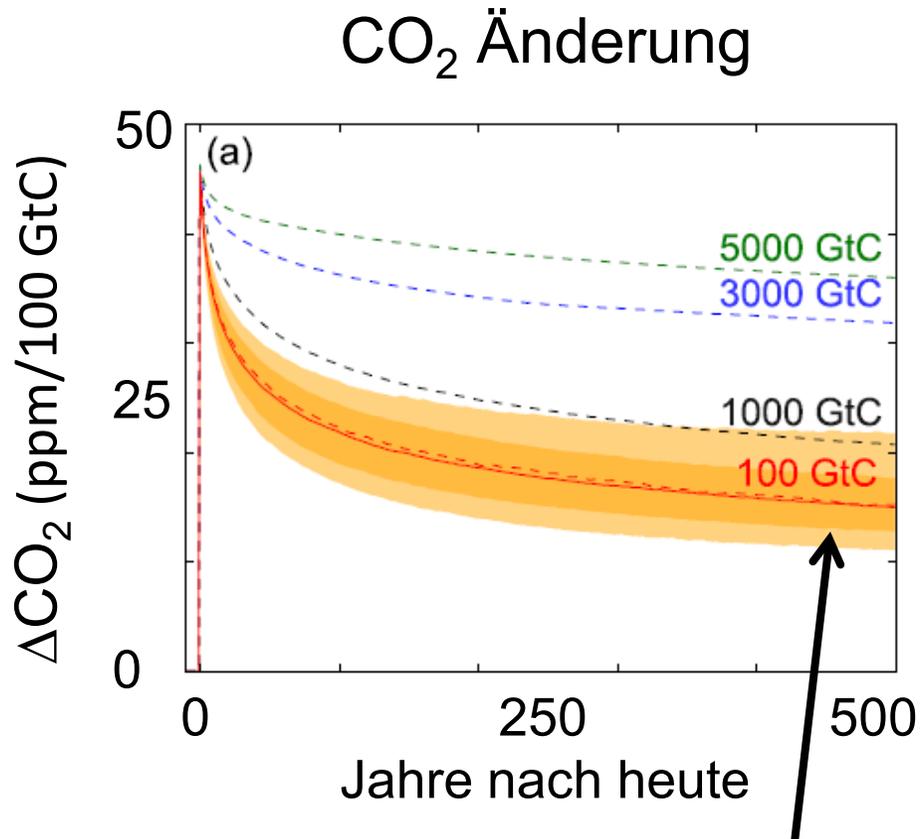


## Irreversible Wirkung der CO<sub>2</sub> Emissionen

Wie verändern die Emissionen der letzten 10 Jahre

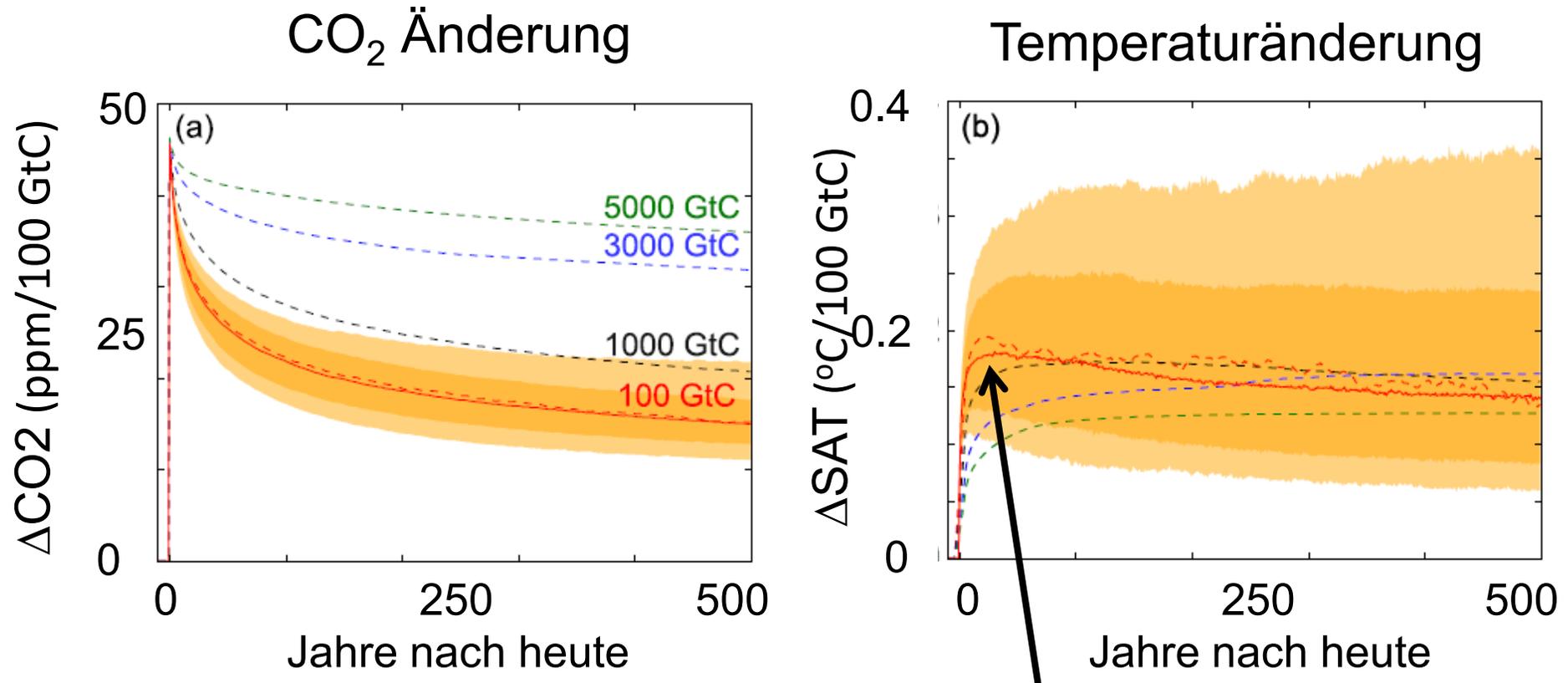
- CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre ?
- die globale mittlere Oberflächentemperatur ?

# Die Auswirkungen der CO<sub>2</sub> Emissionen sind irreversibel auf menschlichen Zeitskalen



Ein grosser Teil der Emissionen bleibt Jahrtausende in der Atmosphäre

# Die Auswirkungen der CO<sub>2</sub> Emissionen sind irreversibel auf menschlichen Zeitskalen



## Temperaturänderung

- innerhalb 10-20 Jahren realisiert
- permanent über Jahrhunderte

- Jede hundert Milliarden Tonnen-C an CO<sub>2</sub> Emissionen führen zu einer «permanenten» Erwärmung von rund 0.17°C (beste Schätzung)
- Stabilisierung der CO<sub>2</sub> Emissionen genügt nicht um Temperatur und Klima zu stabilisieren;  
 Emissionen müssen gegen Null sinken

## International efforts to address climate change

*"Climate change is one of the greatest challenges of our time"*

Copenhagen Accord (2009)

**1992 Rio**

Stabilisierung der Treibhausgase

**1998 Kyoto**

Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissions um 5%

**2010 Cancún**

Begrenzung der Erwärmung auf 2°C

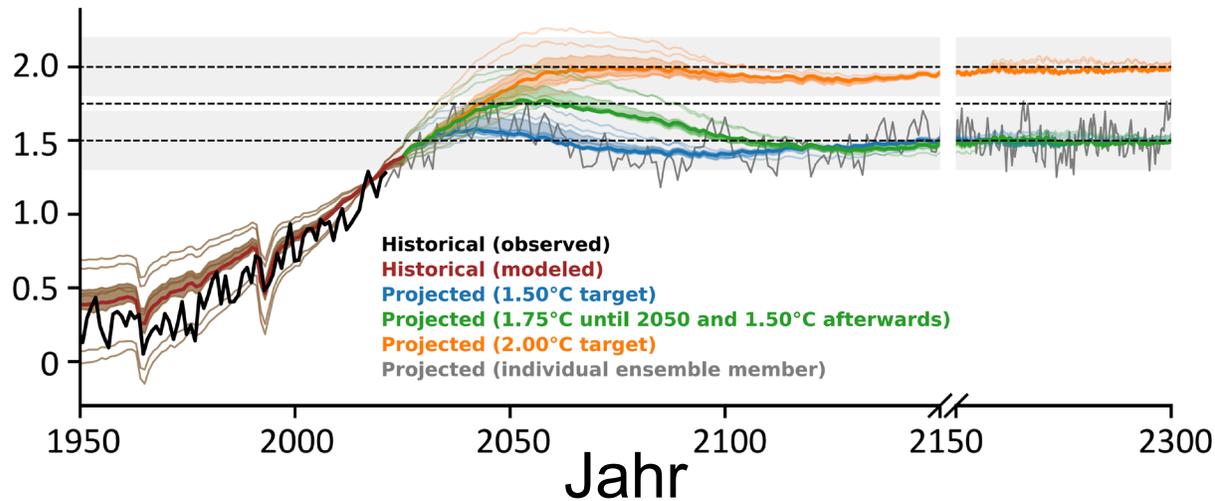
**2015 Paris**

Efforts für 1.5 °C

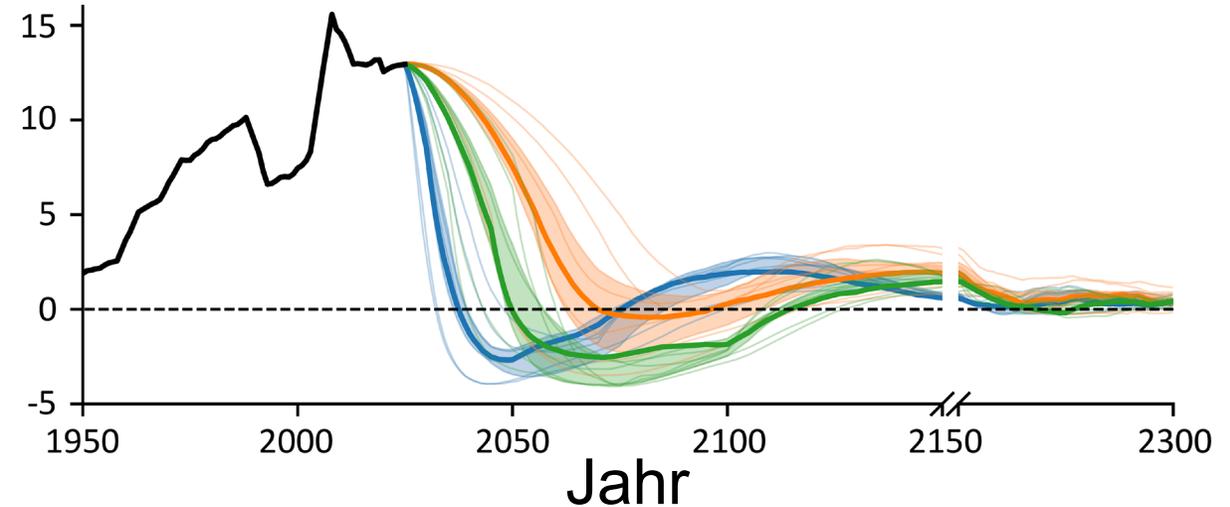
Wie rasch müssen die Emissionen sinken um die Ziele von Paris zu erreichen?

# Wie rasch müssen die Emissionen sinken?

## Erwärmung auf 1.5 und 2°C



## CO<sub>2</sub>-äquivalent Emissionen (Milliarden Tonnen C a<sup>-1</sup>)



- Für das 1.5°C Ziel müssten die Emissionen global innerhalb 10-20 Jahre (2033-2048) auf Null fallen und danach müsste bis zu 3 Milliarden Tonnen C aus der Atmosphäre entfernt werden.
- Für das 2°C Ziel müssen die Emissionen in der 2. Hälfte des Jahrhunderts global auf Null sein.

Wir verändern durch die Verbrennung  
von Kohle, Erdöl und Erdgas  
das Erdsystem irreversibel  
in vielfältiger Weise

