

Climate Engineering – Welches Klima hätten Sie denn gerne!?

Dirk Schindler

05.09.2023

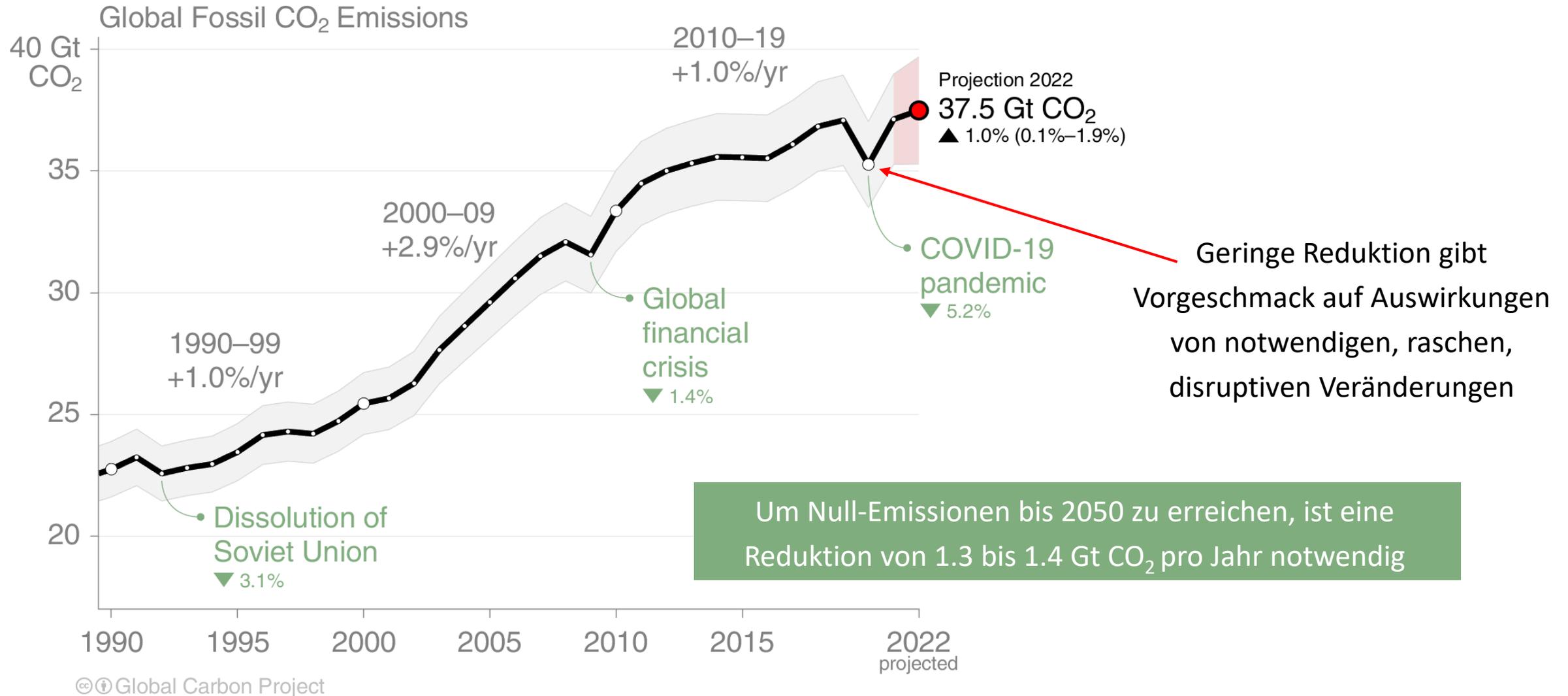
Reaktionen auf und Maßnahmen gegen den derzeit ablaufenden Klimawandel



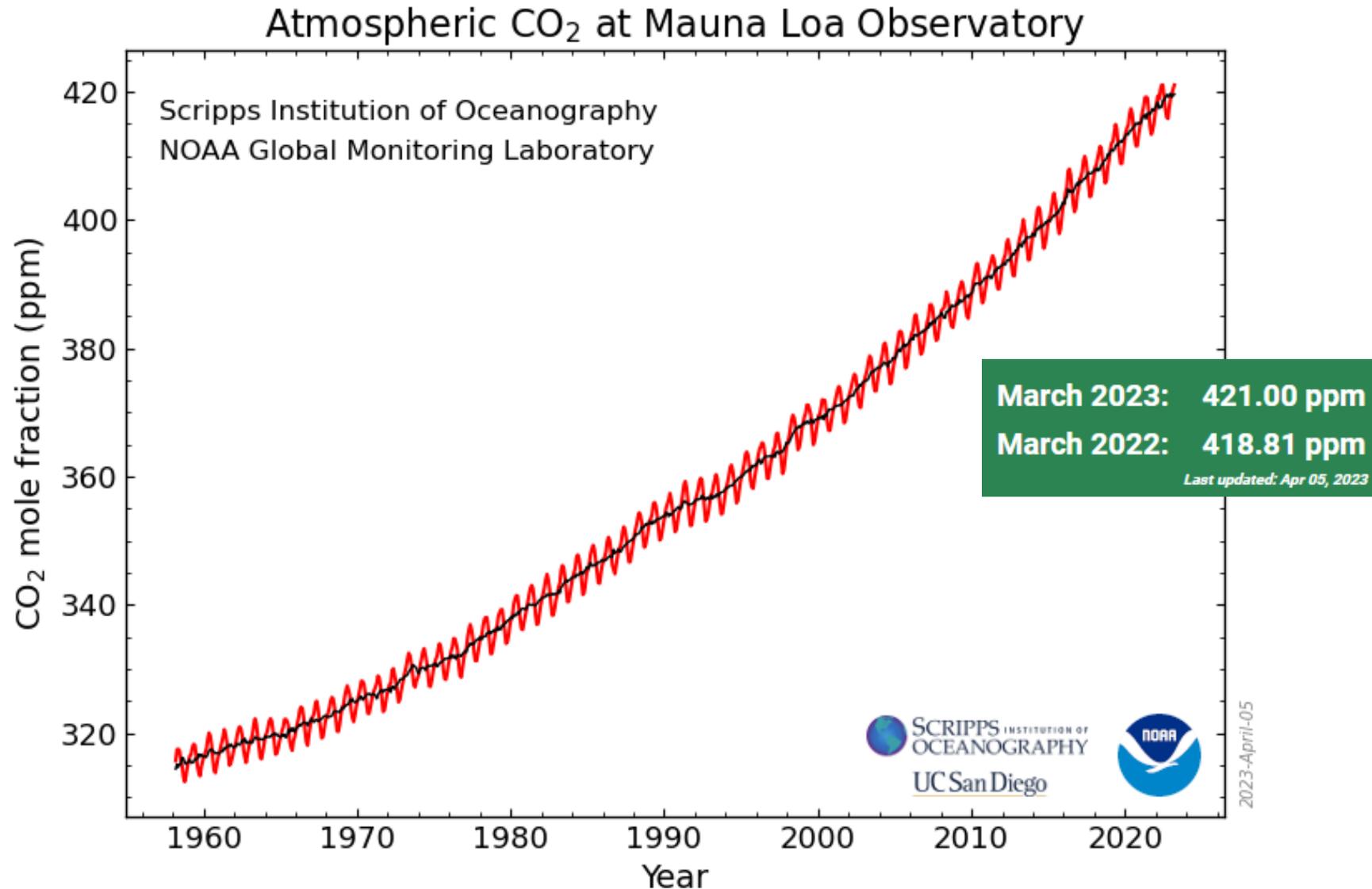
(Rickels et al., 2011)

Climate Engineering (oder **Geoengineering**) befasst sich mit gezielten Eingriffen durch den Einsatz groß-technischer Mittel in klimaphysikalische und biogeochemische Kreisläufe der Erde.

Globale fossile CO₂-Emissionen

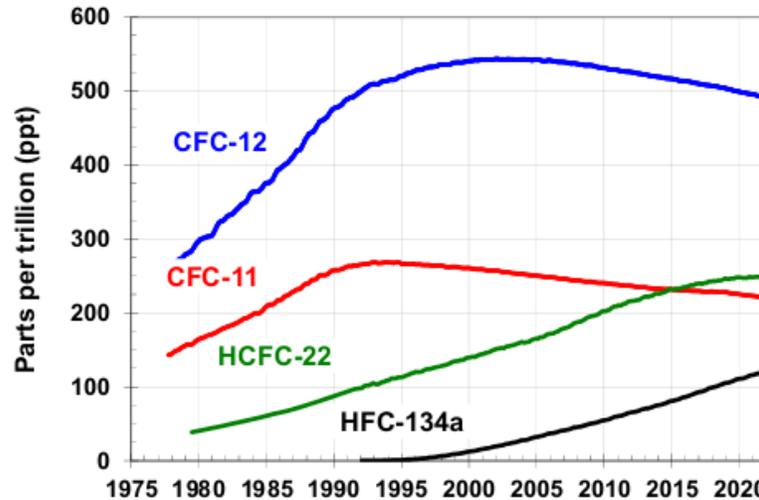
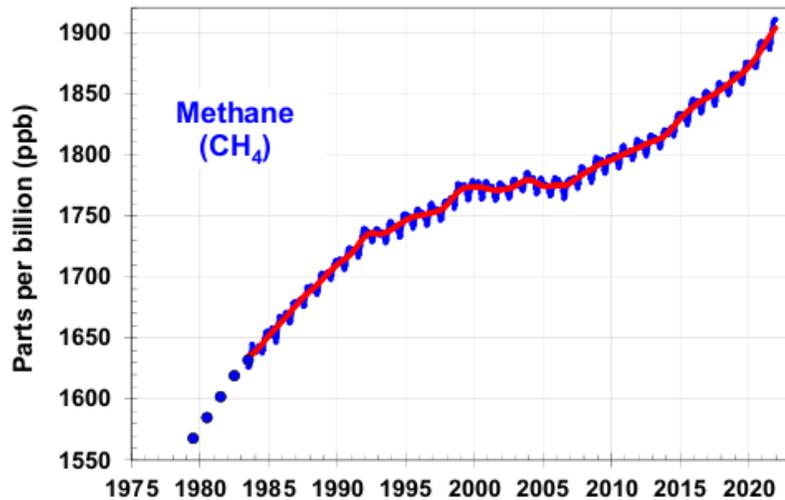
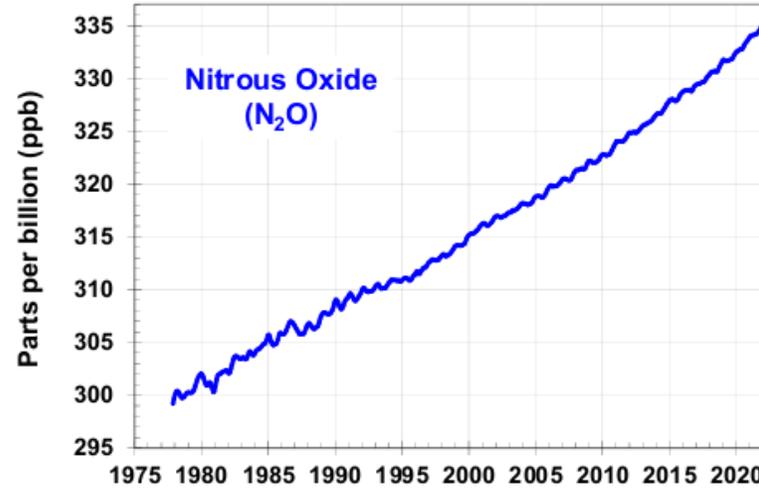
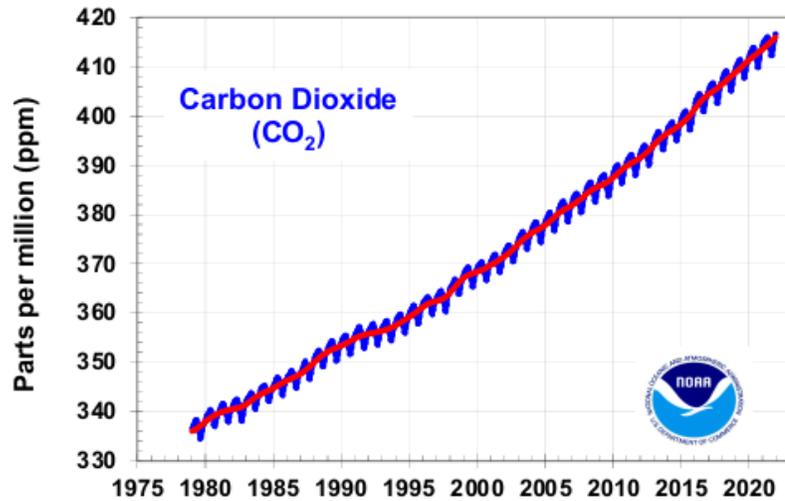


Mittlere atmosphärische CO₂-Konzentration seit 1958



Globale atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen seit 1977

CO₂, N₂O, CH₄, CFC-12, CFC-11 sind für rund 96 % des direkten **Strahlungsantriebs** seit 1750 verantwortlich:



Die drei klimawirksamsten menschenverursachten THG-Konzentrationen steigen bis heute weiter an!

Anstieg mittlerer Lufttemperaturwerte



Since 1850–1900, an increase in surface air temperature of around

Globe
+1.2°C ↗

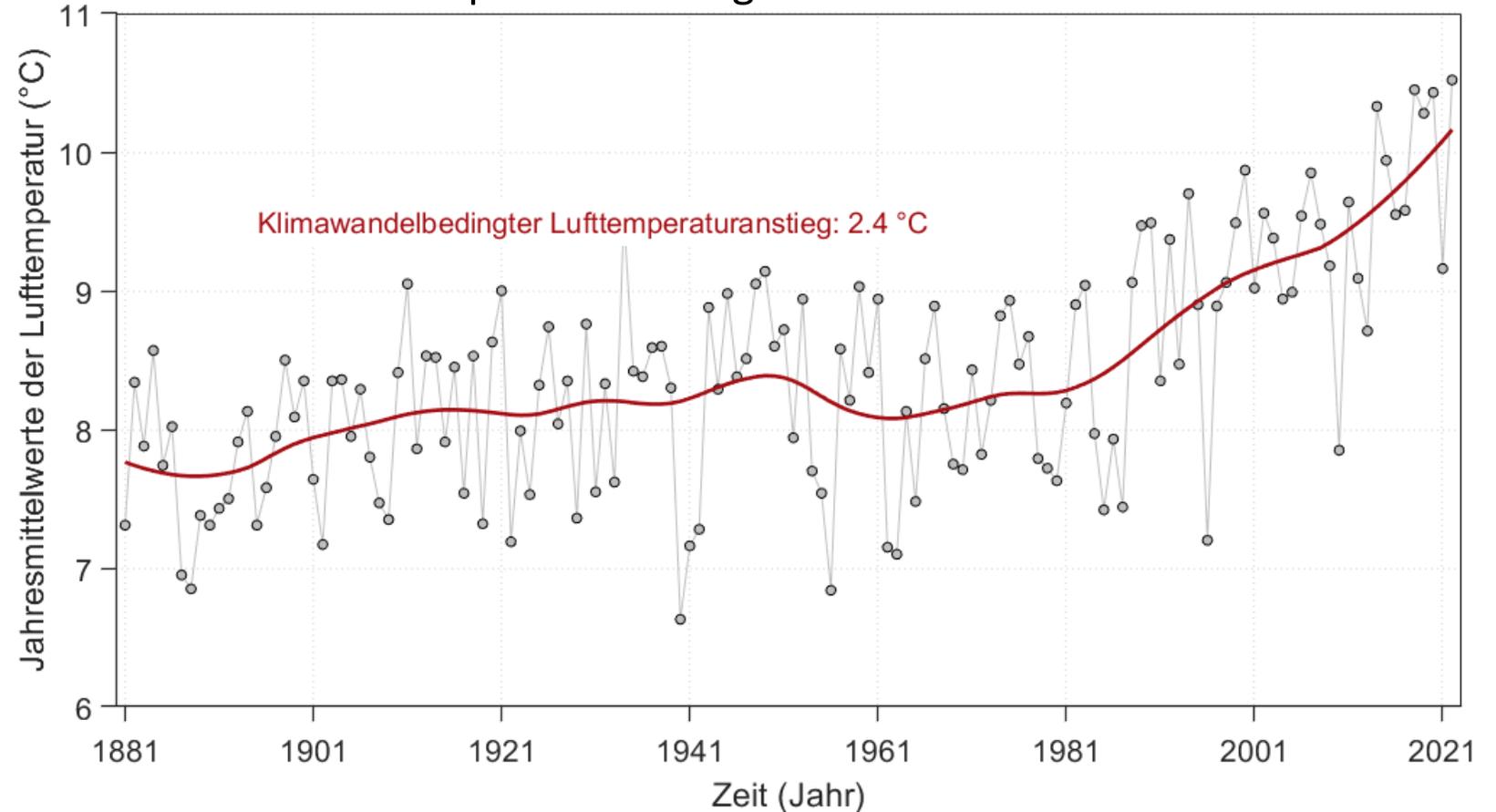
Europe
+2.2°C ↗

Arctic
+3°C ↗

(For latest five-year averages)

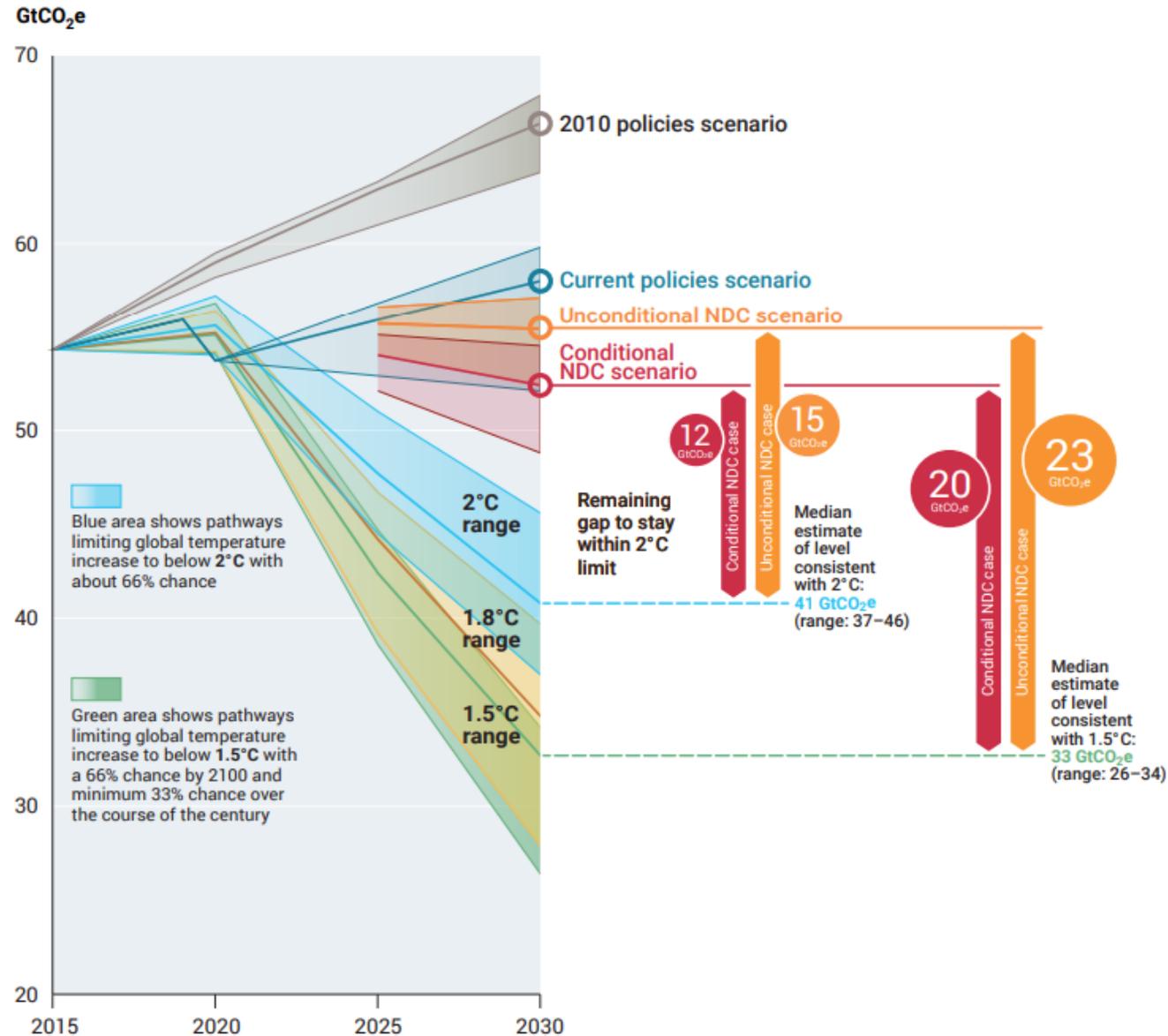
Quelle: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>

Lufttemperaturanstieg in Deutschland seit 1881



→ **Regionaler** Lufttemperaturanstieg deutlich ausgeprägter als **globaler** Lufttemperaturanstieg

Globale Treibhausgasemissionsszenarien bis 2030

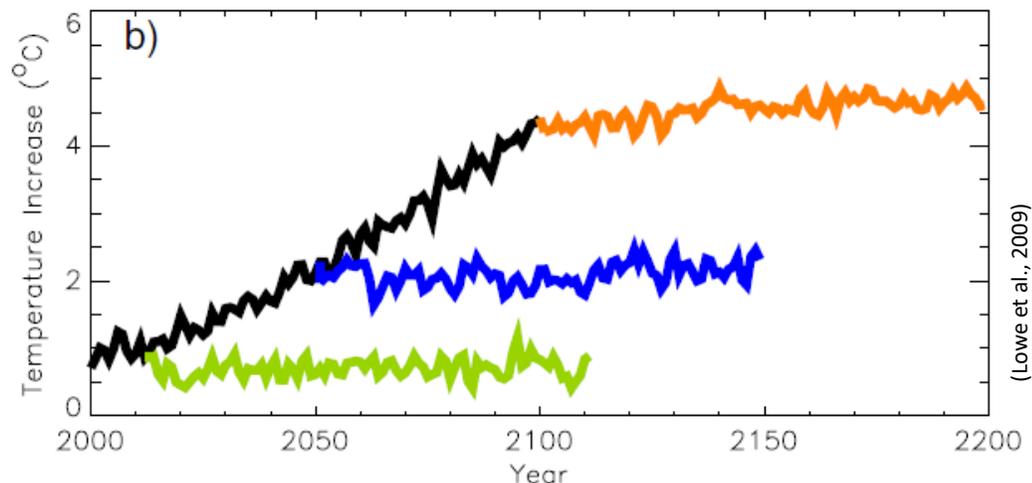
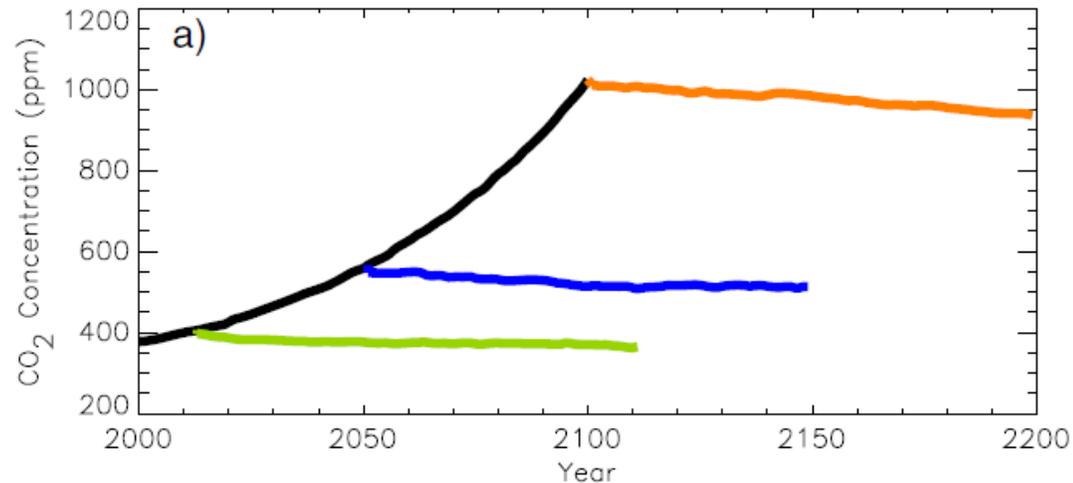


Durch am IPCC-Prozess Beteiligte zugesagte **globale Treibhausgasfreisetzung bis 2030** liegt **viele Milliarden Tonnen (GtCO₂e)** über den Mengen, die für die Erreichung von 1.5 °C und 2.0 °C emittiert werden dürfen

Wirkung eines CO₂-Emissionsstopps auf die mittlere globale Lufttemperaturentwicklung

(A) Vollständiger Stopp der globalen CO₂-Emissionen in den Jahren 2012, 2050 und 2100

(B) Auswirkungen des CO₂-Emissionsstopps in (A) auf die globale Lufttemperaturentwicklung



Selbst ein vollständiger CO₂-Emissionsstopp bewirkt keine kurzfristige Reduktion der Lufttemperatur.

Je länger der Emissionsstopp hinausgezögert wird, umso höher ist das damit verbundene Lufttemperaturniveau! **Dauerhaft!**

(Netto)CO₂-, (Netto)Treibhausgas- und Klimaneutralität

(Netto)CO₂-Neutralität: CO₂-Emissionen sinken auf null oder werden kompensiert,

→ bilanzielle CO₂-Neutralität

CO₂-Neutralität muss als Erstes rasch erreicht werden

(Netto)Treibhausgasneutralität: THG-Emissionen (CO₂, CH₄, N₂O) sinken auf null oder werden kompensiert

→ bilanzielle THG-Neutralität

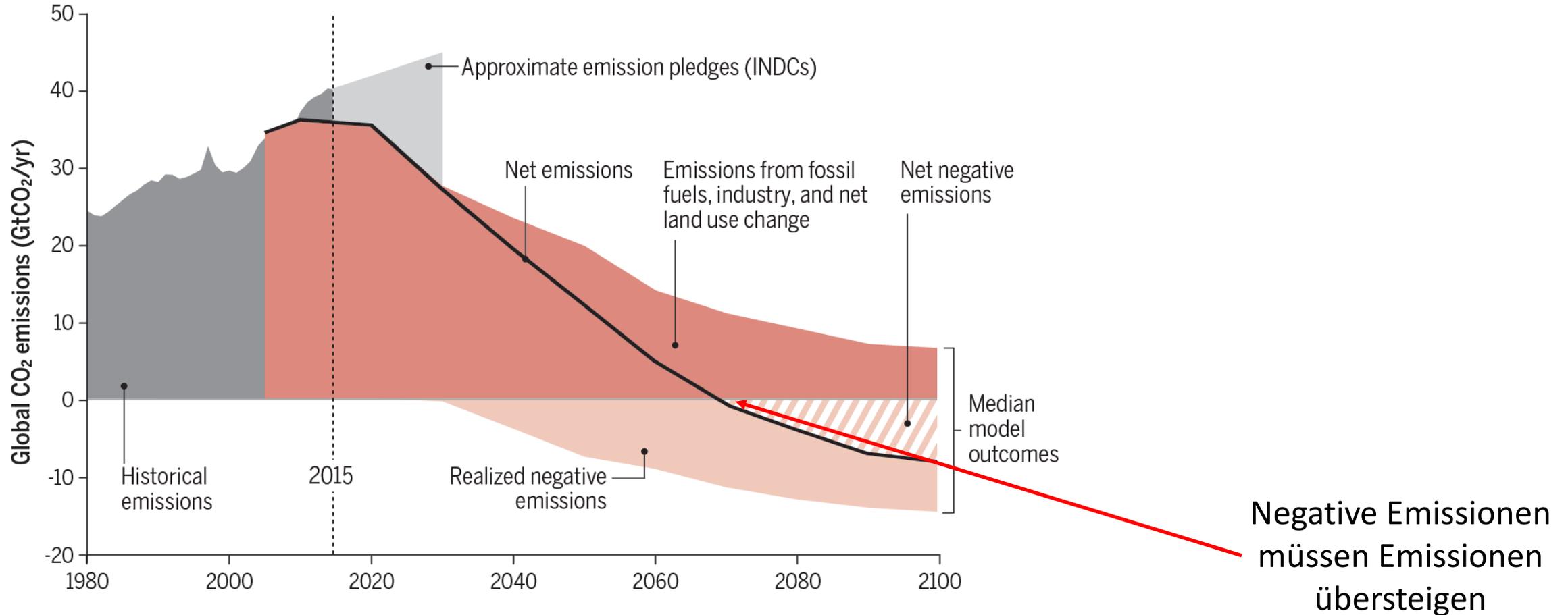
THG-Neutralität wird in Industrieländern erst 5-10 Jahre nach CO₂-Neutralität erreicht, global erst nach mehr als 15 Jahren später

Klimaneutralität: Prozesse, Tätigkeiten und Handlungen haben keinen Einfluss auf das Klima

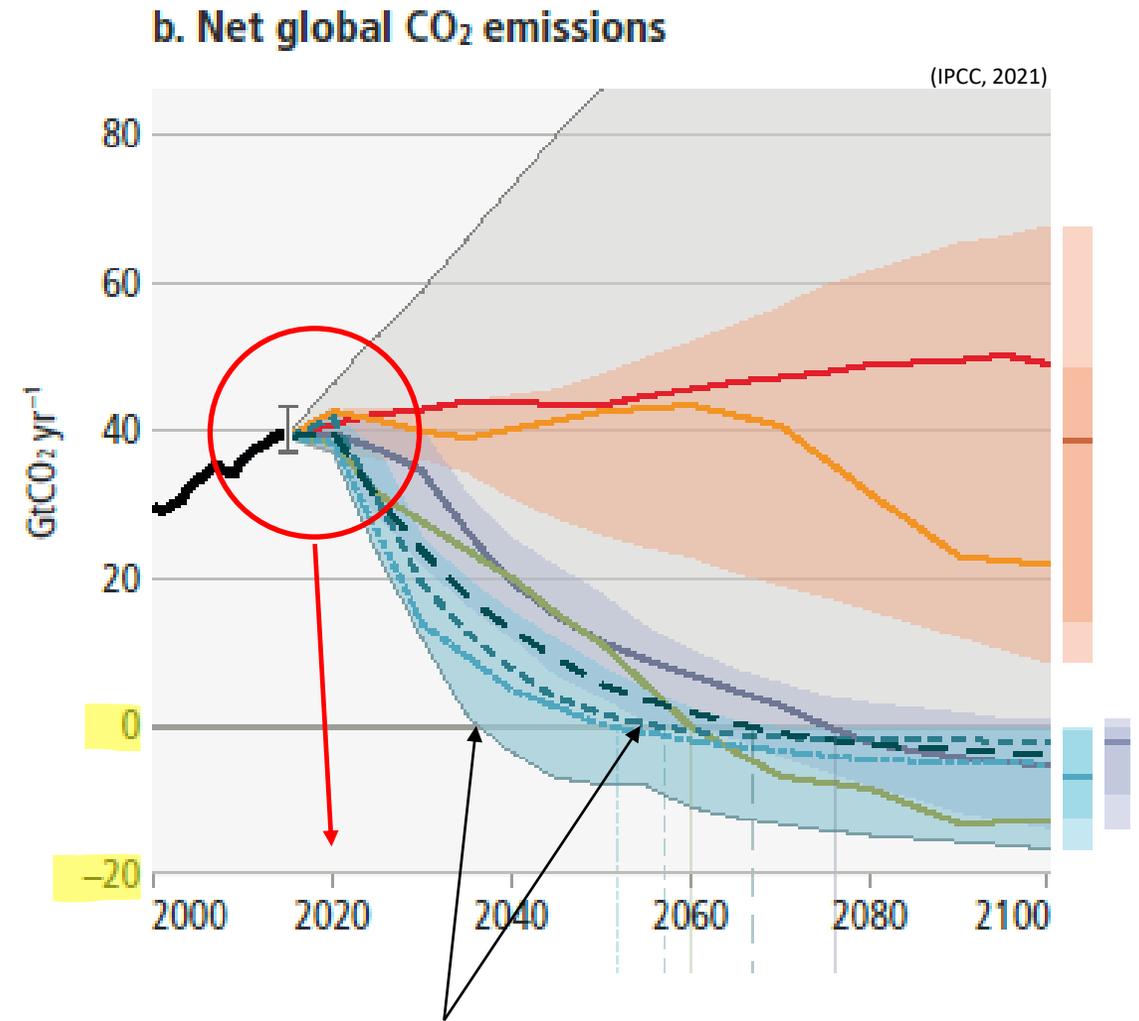
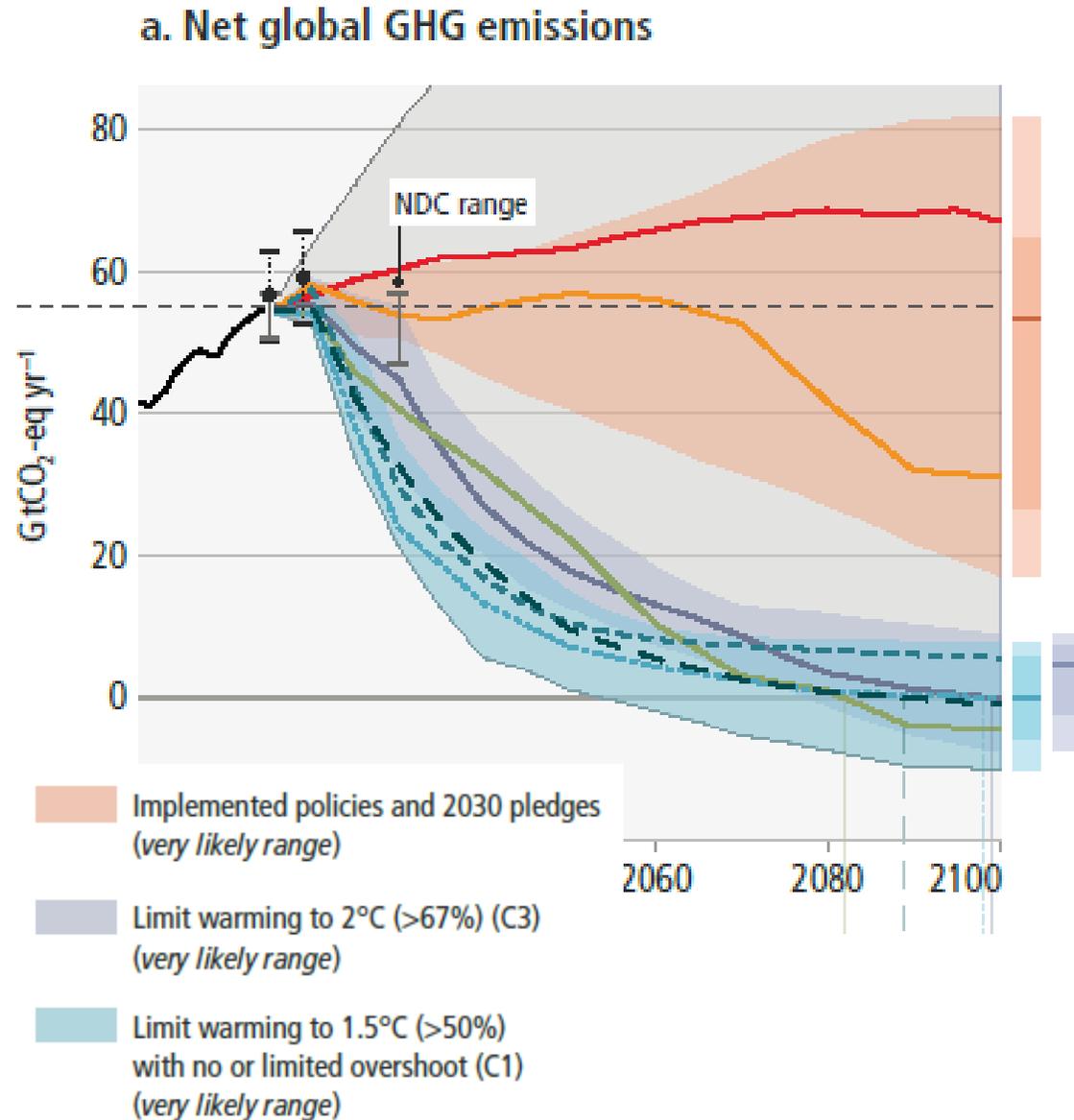
→ z. B. Wolkenbildung durch Flugverkehr, Landnutzungsänderungen

Für die Erreichung des globalen 2 °C-Ziels notwendige negative Nettoemissionen

Um deutlich vor 2100 **negative Nettoemissionen (CO₂-Emissionen < 0.0 GtCO₂)** erreichen zu können, müssen spätestens ab 2030 negative Emissionen erzielt werden. Andernfalls kann das 2 °C-Ziel nicht erreicht werden.

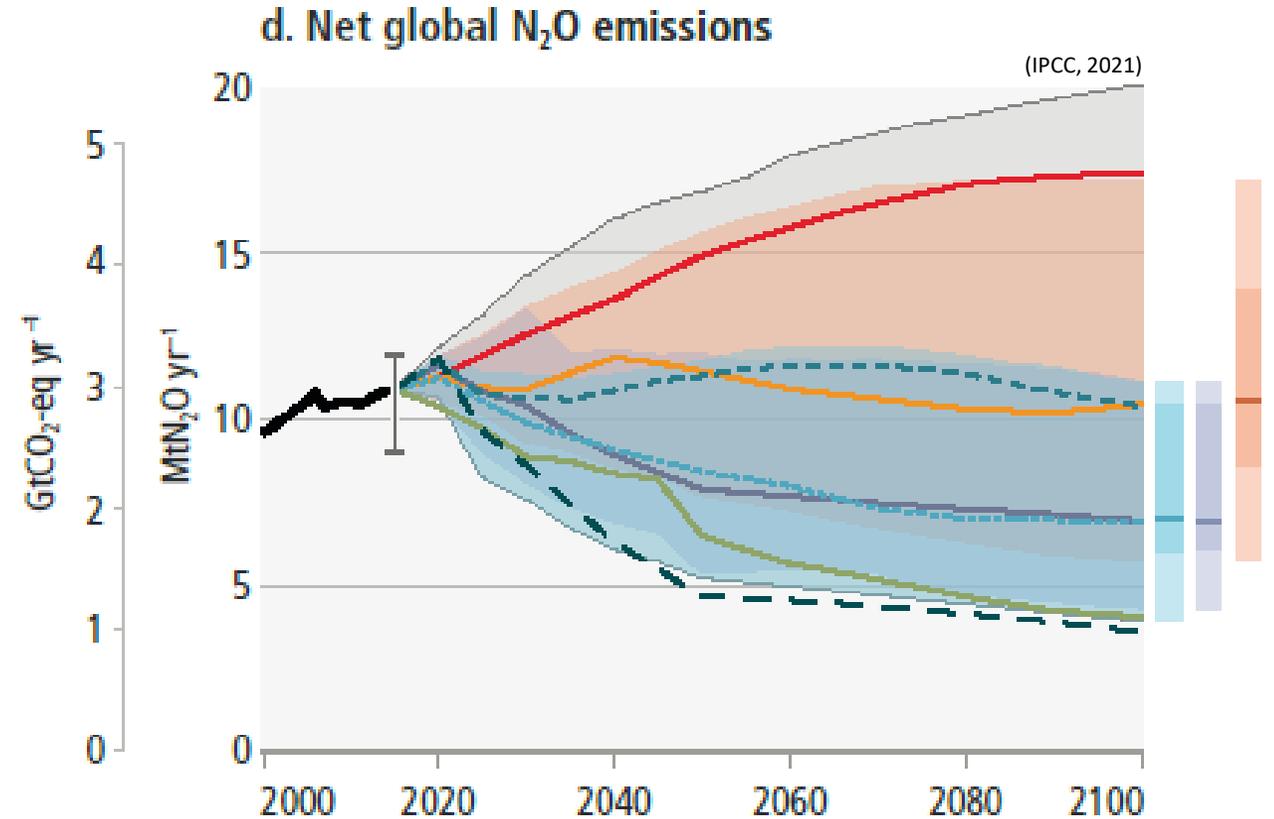
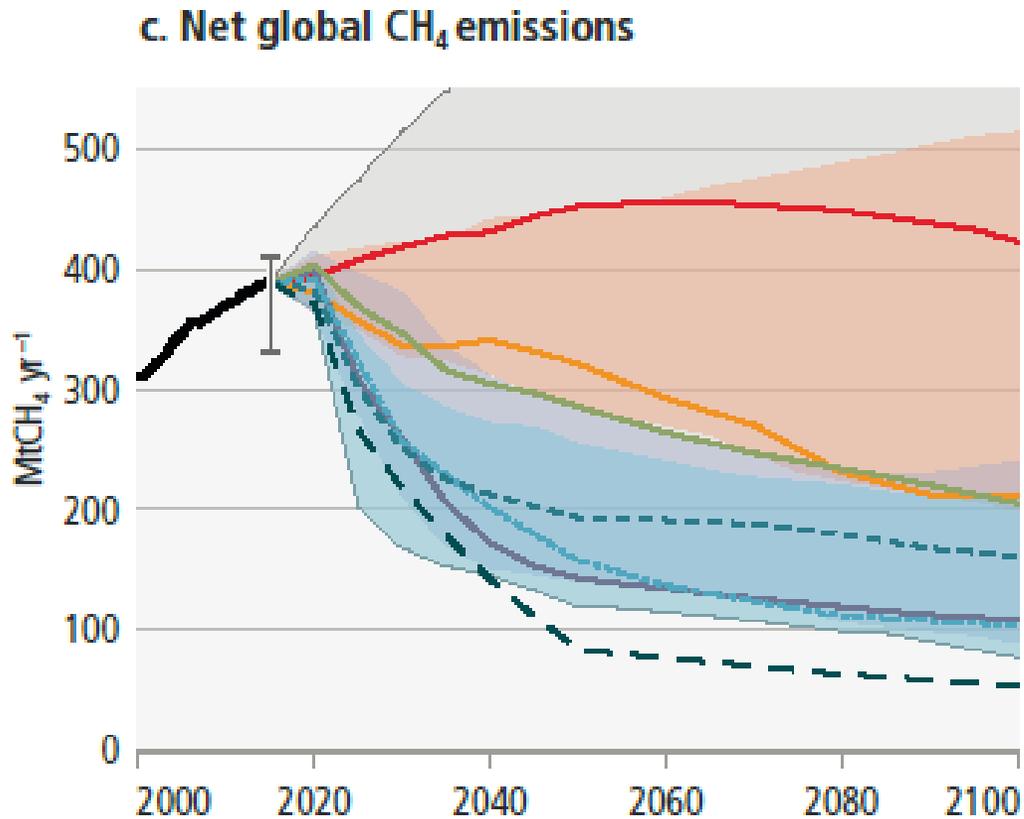


Globale Treibhausgas- (GHG) und CO₂-Emissionen bis 2100



Die CO₂-Reduzierung muss tiefgreifend sein, um die Nicht-CO₂-Treibhausgaswirkungen zu kompensieren

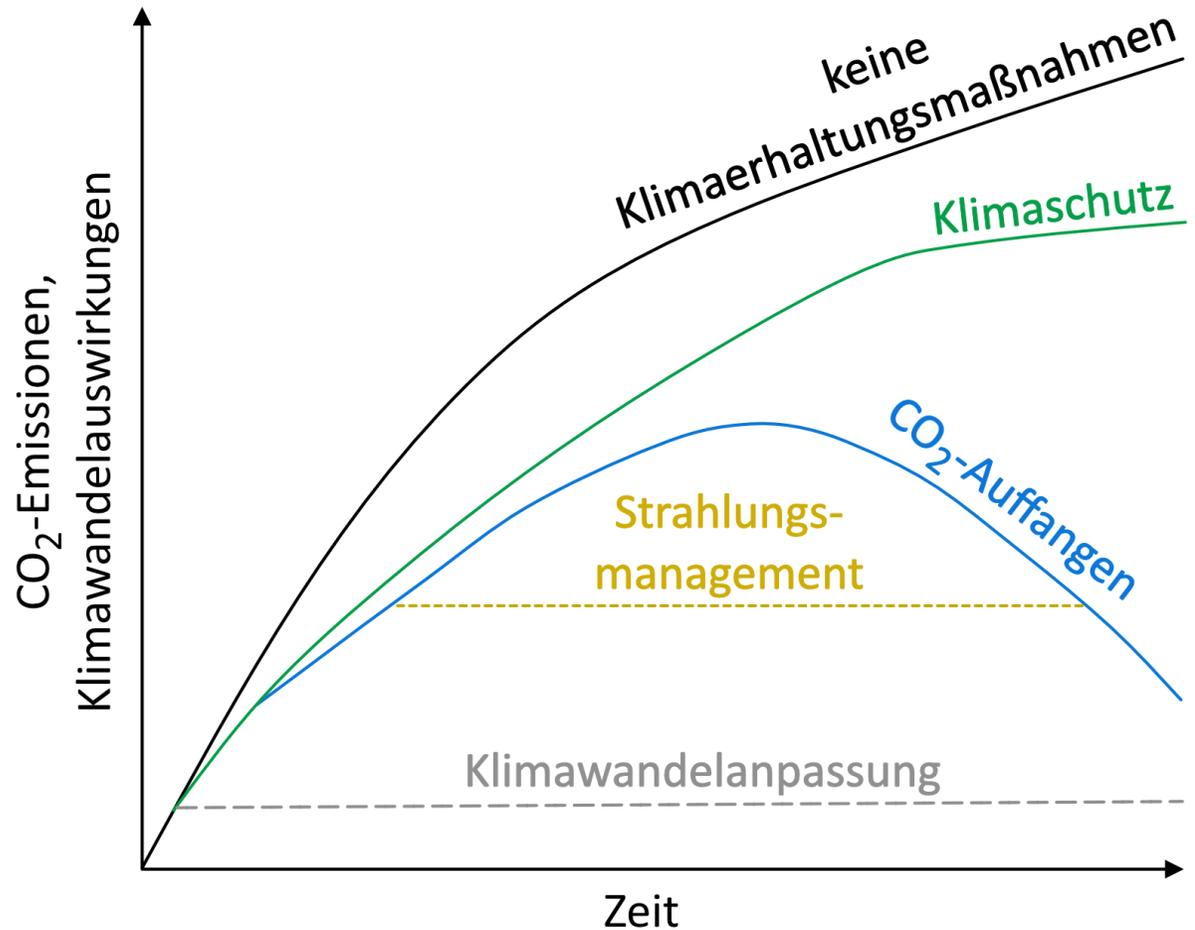
Globale Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen bis 2100



Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen erreichen bis 2100 nicht die Nulllinie

→ Es deutet sich an, dass eine **bilanzielle Treibhausgasneutralität** angestrebt werden muss, die nur erreicht werden kann, wenn der Atmosphäre enorme CO₂-Mengen entzogen werden

Climate Engineering – Beitrag zur Klimaerhaltung – Zeitlichkeit von Maßnahmen



(Reynolds, 2019)

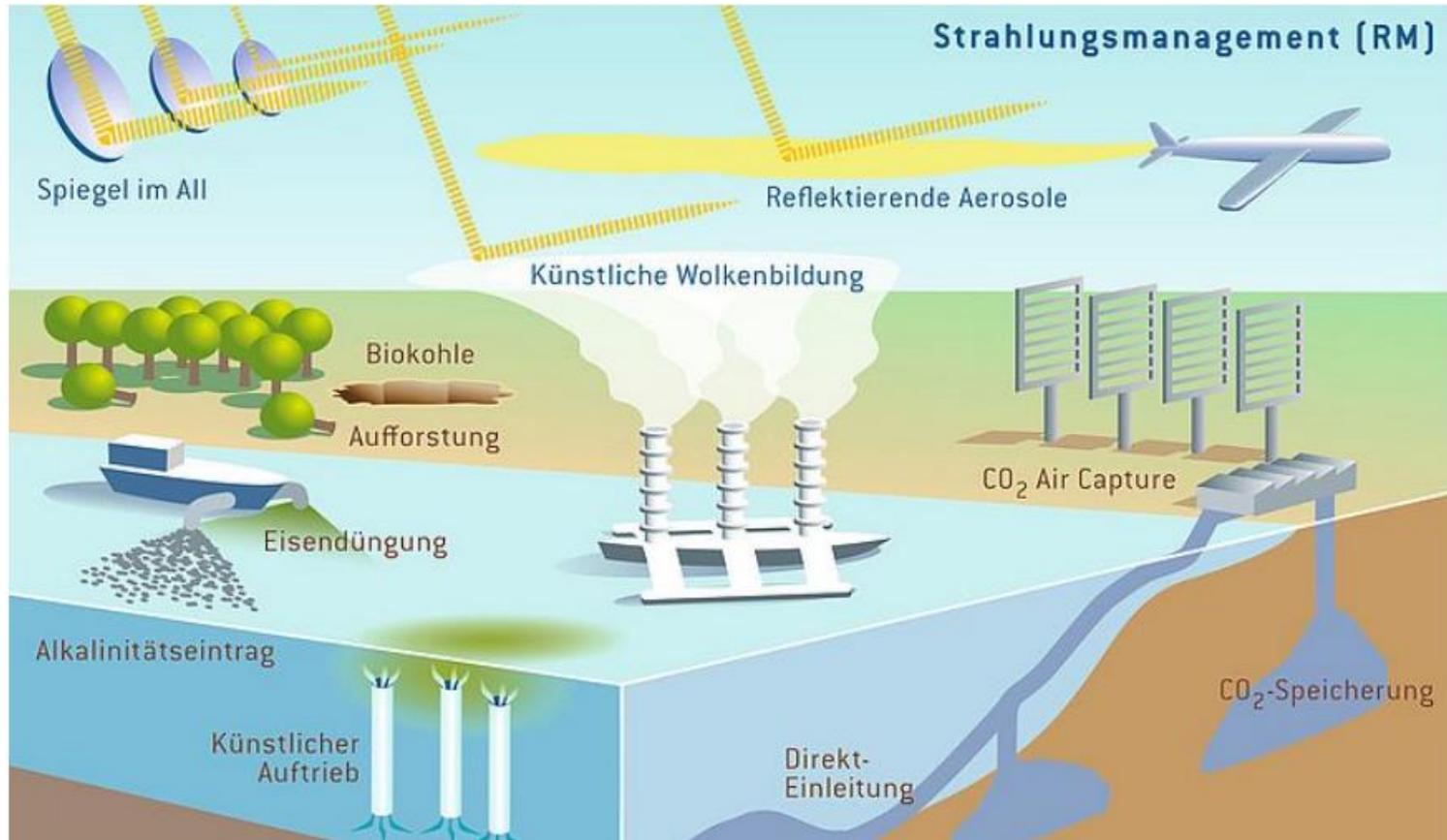
KLIMASCHUTZ geschieht zu langsam, kann Klimaerhaltung nicht schnell genug vorantreiben

CO₂-AUFFANGEN ist ebenfalls langsam, trägt aber zur THG-Reduktion bei

STRAHLUNGSMANAGEMENT wirkt sich nicht auf THG-Konzentrationen aus, könnte aber „gefährlichen“ Klimawandel rasch abmildern (*shaving the peak*)

ANPASSUNG hat keinen Einfluss auf den Klimawandel, kann aber helfen, Auswirkungen abzuschwächen

Aktuell diskutierte Climate Engineering-Maßnahmen

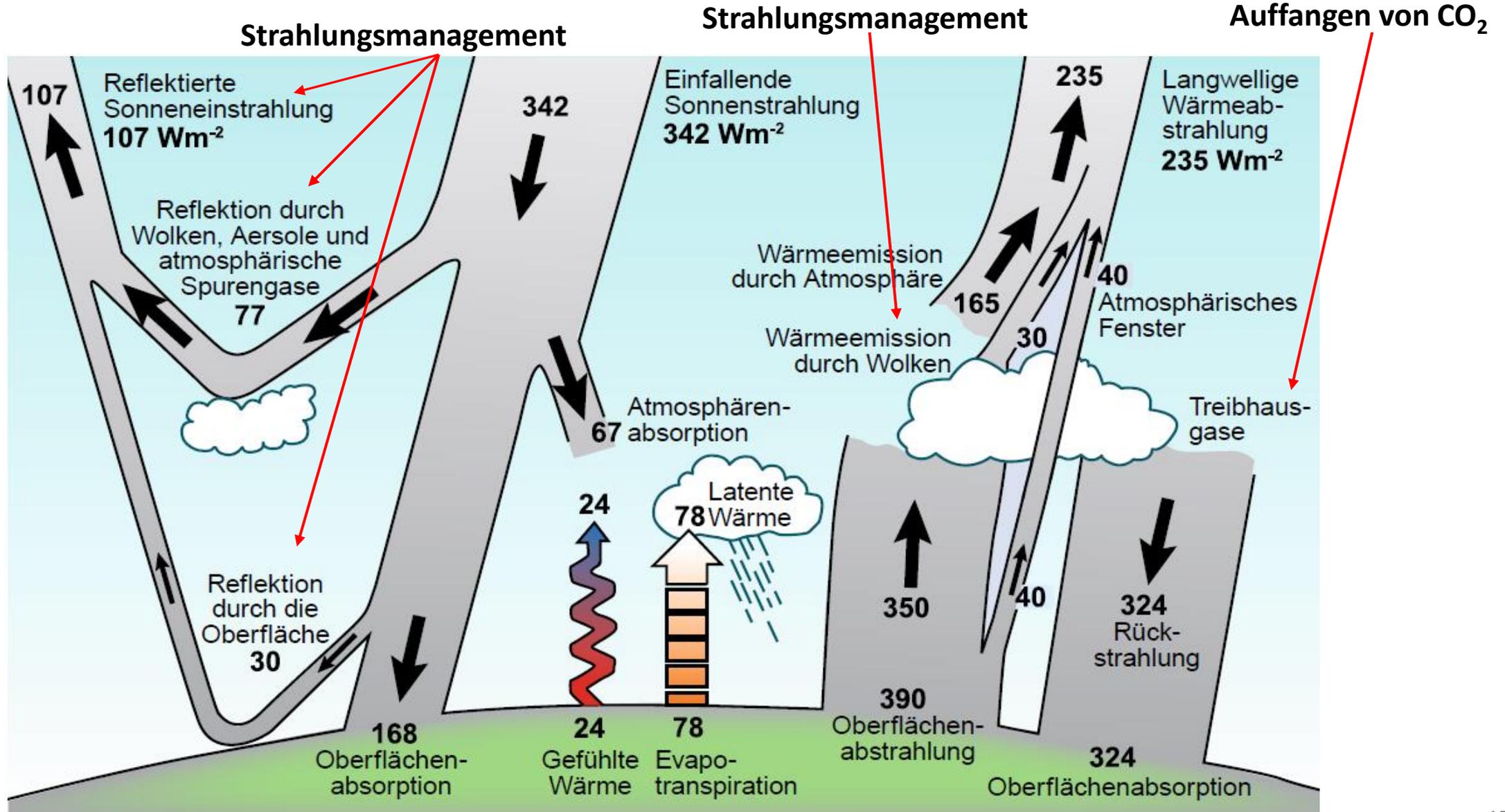


(Rickels et al., 2011)

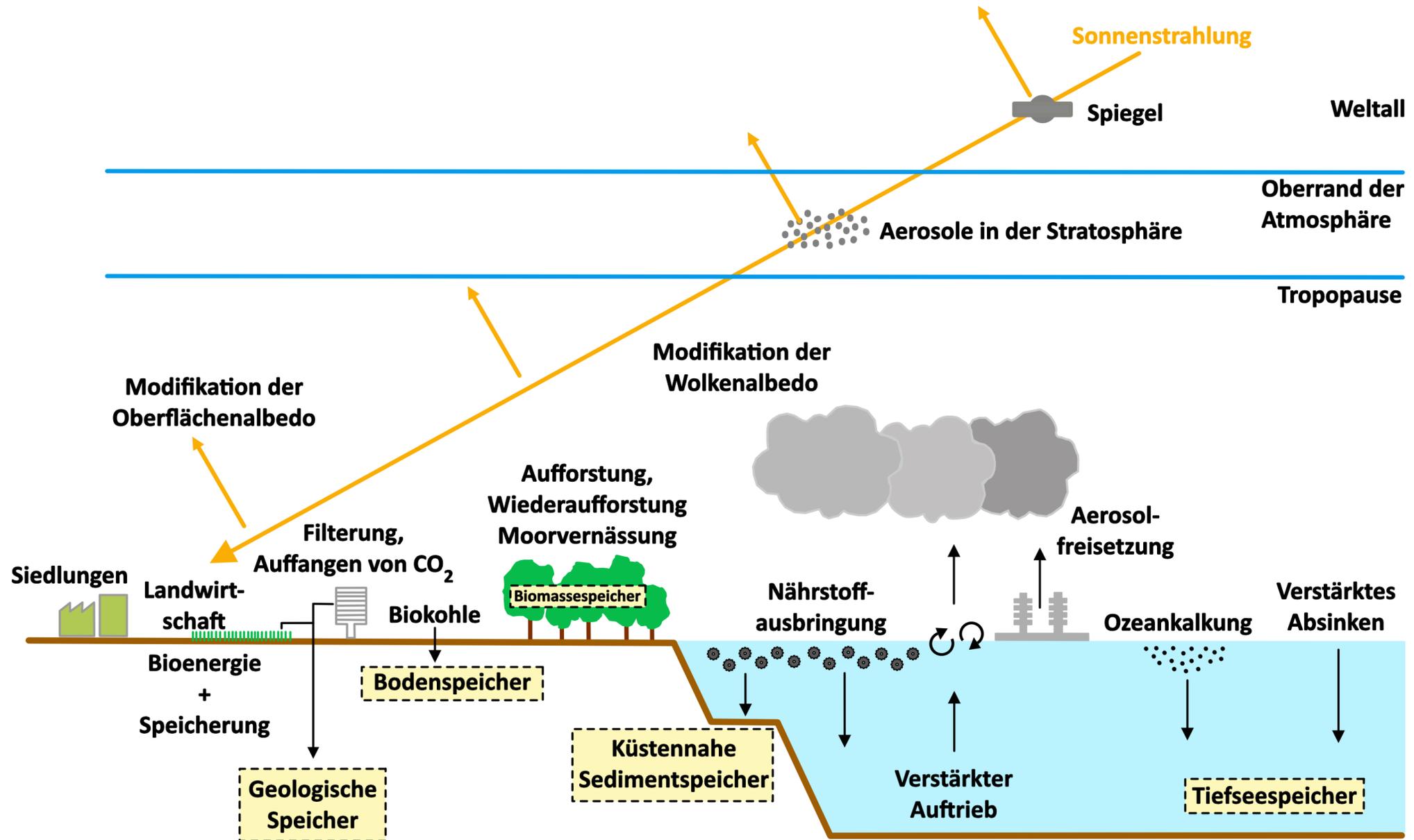
Hauptwirkungspfade der Implementierung

1. **Auffangen/Abscheiden und Speichern von CO₂**
(*CO₂ Capture and Storage, CCS*)
2. **Strahlungsmanagement**
(*Radiation management, RM*)

Wirkungspfade von Climate Engineering-Maßnahmen



Climate Engineering-Ansätze



Was sind **CCS** und **CCU(S)**?

CCS steht für *Carbon Capture and Storage*, d. h. für die **Abscheidung** und **Speicherung** von Kohlenstoff.

Durch die Nutzung fossiler Brennstoffe entstandenes CO₂ soll in den **tiefen geologischen Untergrund zurückgebracht werden**, damit es der Atmosphäre dauerhaft entzogen wird.

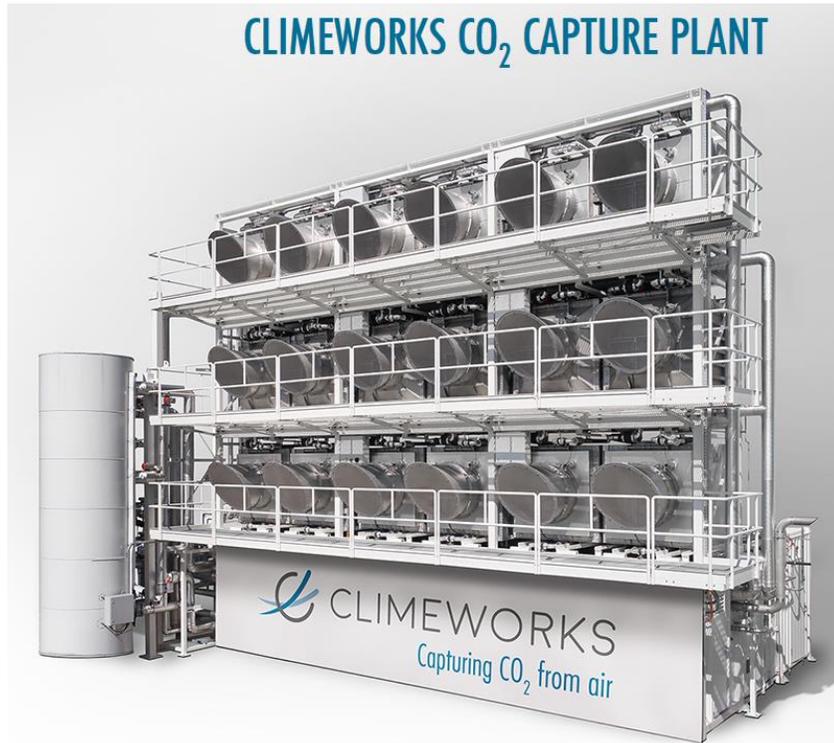
Damit die CO₂-Speicherung klimawirksam ist, muss CO₂ für mehrere Jahrtausende unter der Erde verbleiben.

CCU(S) steht für *Carbon Capture and Utilization (and Storage)*, d. h. für die **Abscheidung** und **Nutzung** von Kohlenstoff.

Das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstandene CO₂ soll **in weiteren chemischen Prozessen oder z. B. zur Algenzucht verwendet werden**.

CCU ist damit **nicht immer klimawirksam**, weil es zu einer verzögerten CO₂-Freisetzung kommen kann.

Filtern von CO₂ aus der Luft (*Direct Air Capture*)



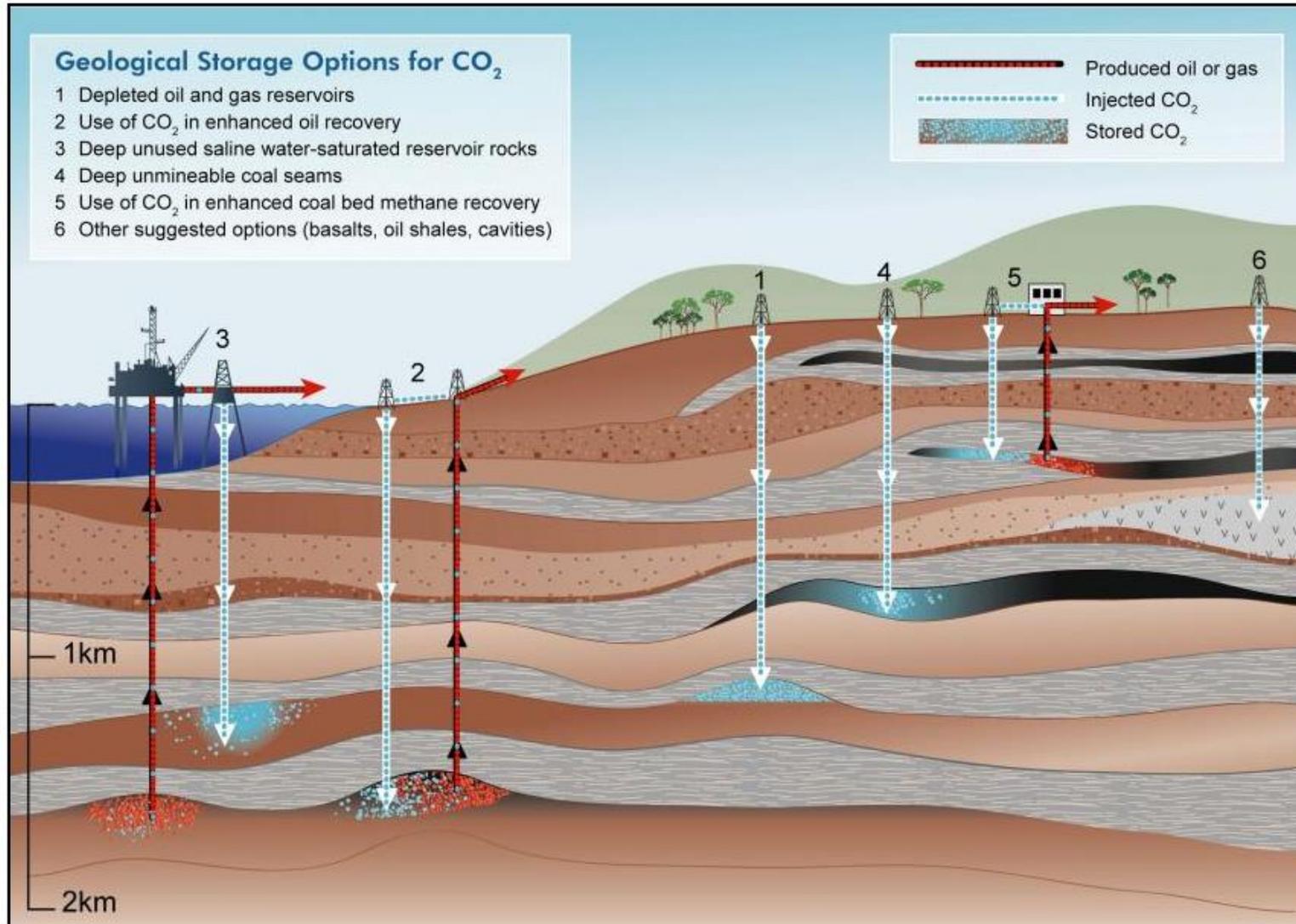
Standort: Island

Elektrische Energie und Wärmeenergie: werden von einem Geothermiekraftwerk geliefert

Maximale jährliche Filterleistung: 4000 tCO₂

CO₂-Speicherung: Verpressung im Untergrund und Bindung an Basalt bei dessen Verwitterung

Potenzielle CO₂-Speicherstätten: Erdgas- und Erdöllagerstätten

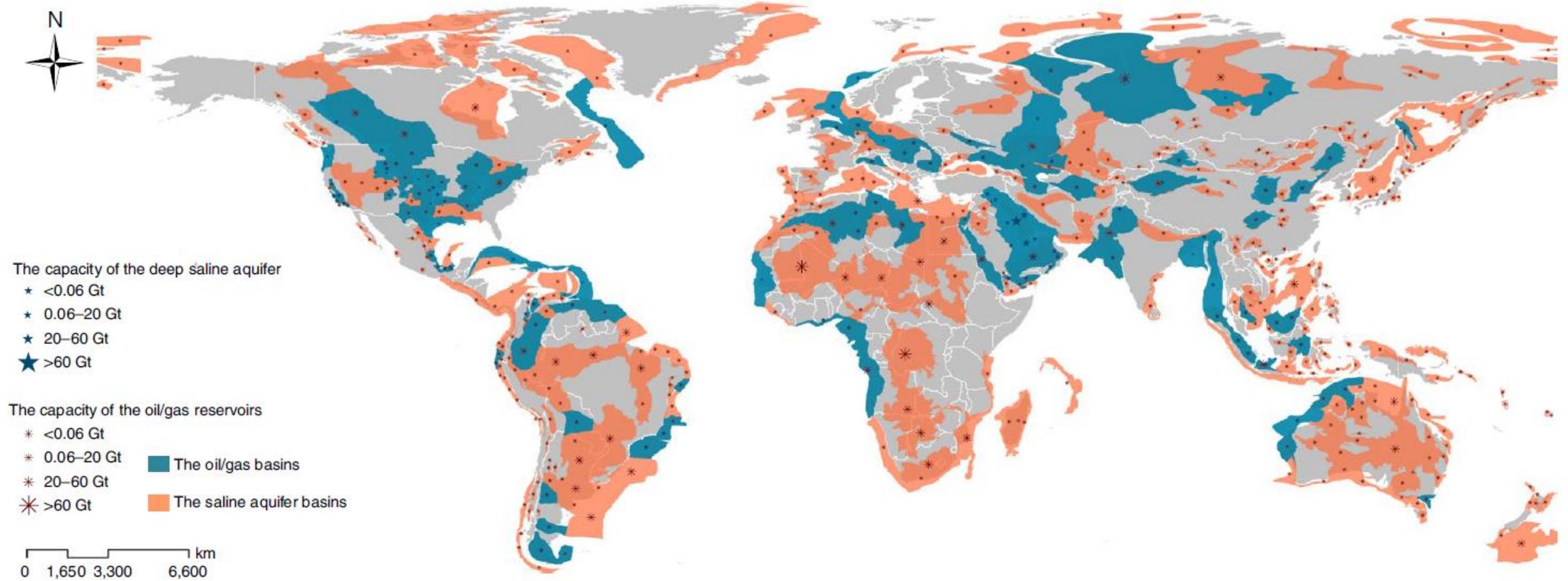


Erdgas- und Erdöllagerstätten gelten als sehr günstige CO₂-Speicher, da

- Deckschichten Jahrmillionen Gase zurückhalten konnten,
- der Untergrund bereits gut bekannt ist,
- vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann,
- CO₂-Injektion in Lagerstätten die Produktion fossiler Energieträger stimuliert.

Verteilung potenzieller CO₂-Speicherstätten: Erdgas- und Erdöllagerstätten, saline Aquifere

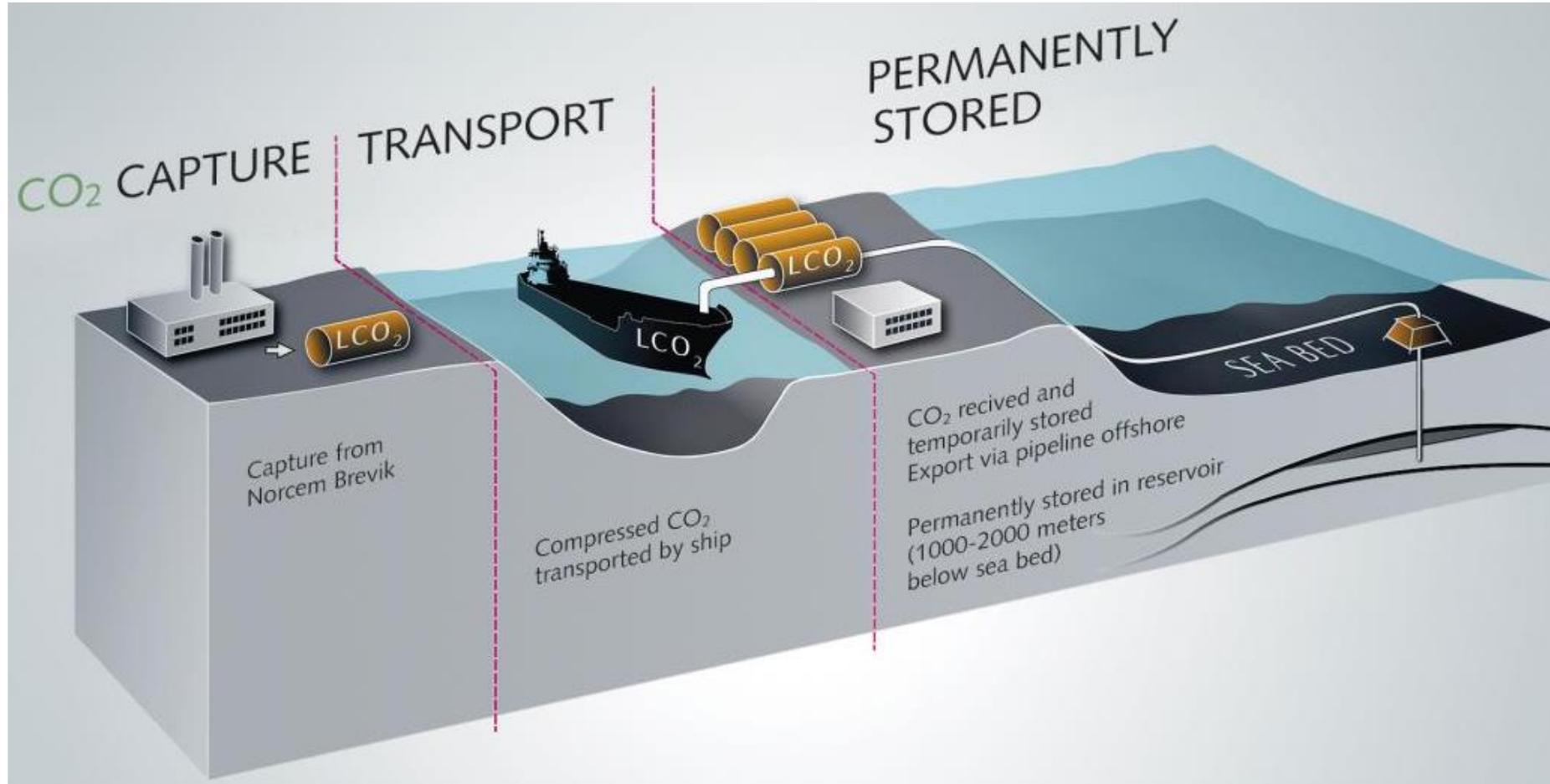
Global storage potential



(Wei et al., 2021)

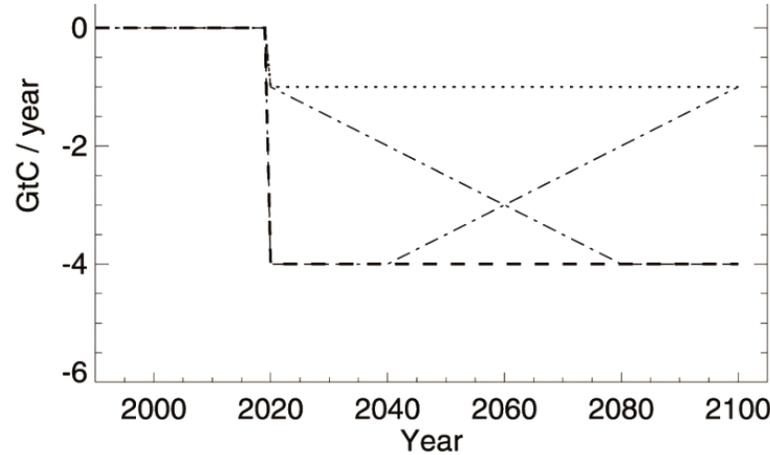
Mögliche Pfade zur atmosphärischen CO₂-Reduktion durch CCS

CSS im industriellen Maßstab in einem norwegischen Zementwerk (Norcem Brevik) ab 2024: Jährlich sollen 400.000 tCO₂ abgeschieden (*Capture*) und zur dauerhaften Lagerung (*Storage*) transportiert werden.

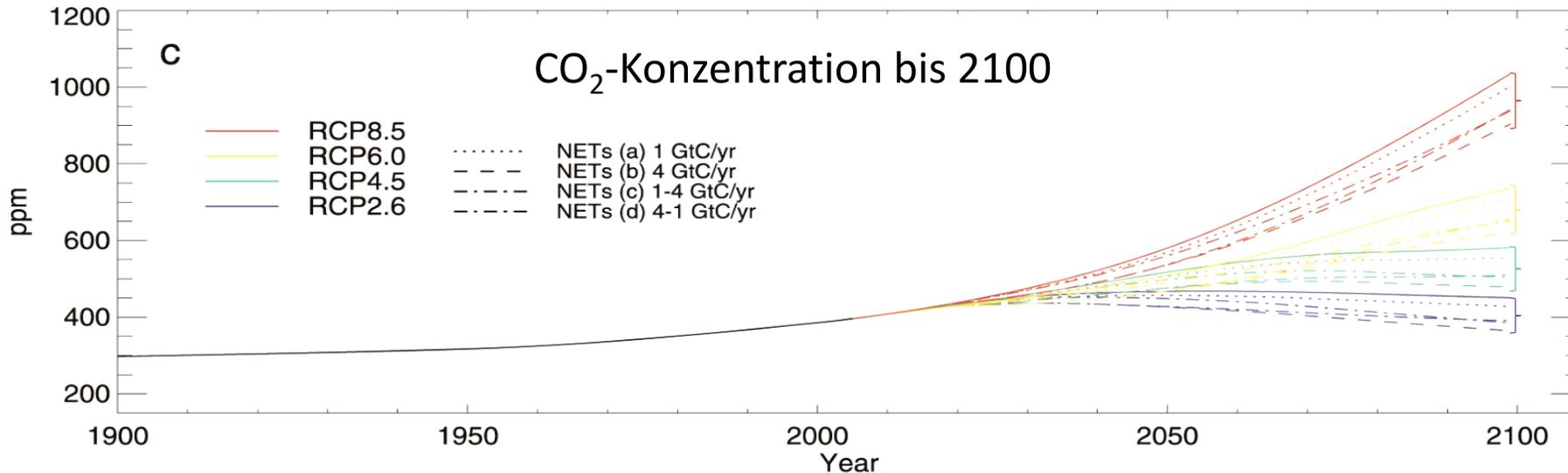


Mögliche Pfade zur atmosphärischen CO₂-Reduktion durch Auffangen

Idealisierte CO₂-Reduktionspfade bis 2100



- Konstant 1 GtC/Jahr
- - - Konstant 4 GtC/Jahr
- · - · 1 GtC/Jahr, dann Erhöhung auf 4 GtC/yr
- - - - 4 GtC/Jahr, dann Reduktion auf 1 GtC/Jahr



CO₂-Reduktion nicht
Szenarien durchbrechend



Klimaschutz muss erste
Wahl bleiben

Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW, 2023)

§ 1 Zweck des Gesetzes

Dieses Gesetz bezweckt den Schutz des Klimas und die Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels in Baden-Württemberg. Es zielt darauf ab,

1. im Rahmen der internationalen, europäischen und nationalen Klimaschutzziele einen angemessenen Beitrag [...] hin zu **Netto-Treibhausgasneutralität** zu leisten ...

§ 2 Begriffsbestimmungen

- (2) Netto-Treibhausgasneutralität im Sinne dieses Gesetzes ist das Gleichgewicht zwischen Treibhausgasemissionen aus Quellen und dem **Abbau von Treibhausgasen durch Senken**.

§ 3 Klima-Rangfolge

(1) Bei dem Schutz des Klimas soll folgende Rangfolge in absteigender Reihe eingehalten werden:

1. Vermeiden von Treibhausgasemissionen,
2. Verringern von Treibhausgasemissionen und
3. **Versenken nicht** oder mit verhältnismäßigem Aufwand nicht **zu vermeidender** oder zu verringernder **Treibhausgase**.

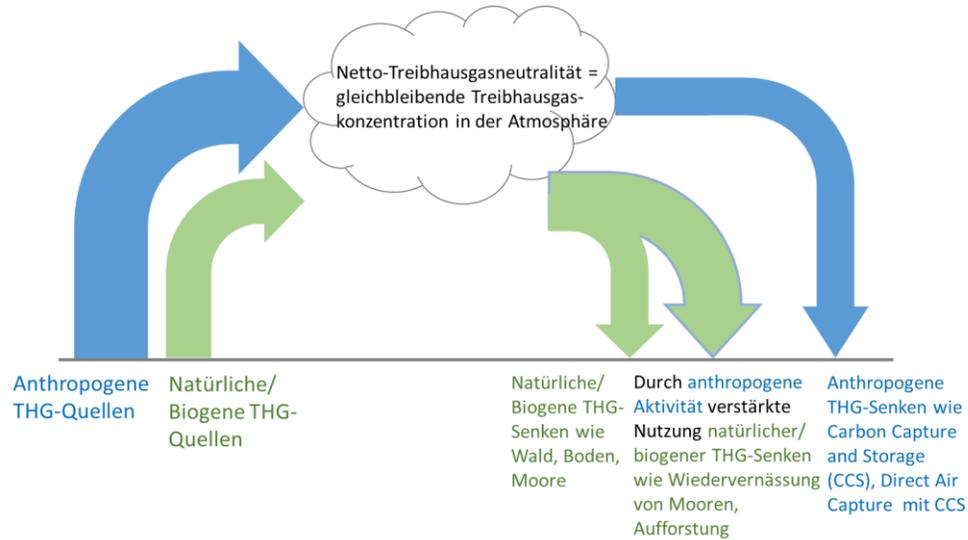
Erdgas- und Erdöllagerstätten

Erdgas, Speicherkapazität ≈ 2.75 Gt
 Erdöl, Speicherkapazität ≈ 0.13 Gt



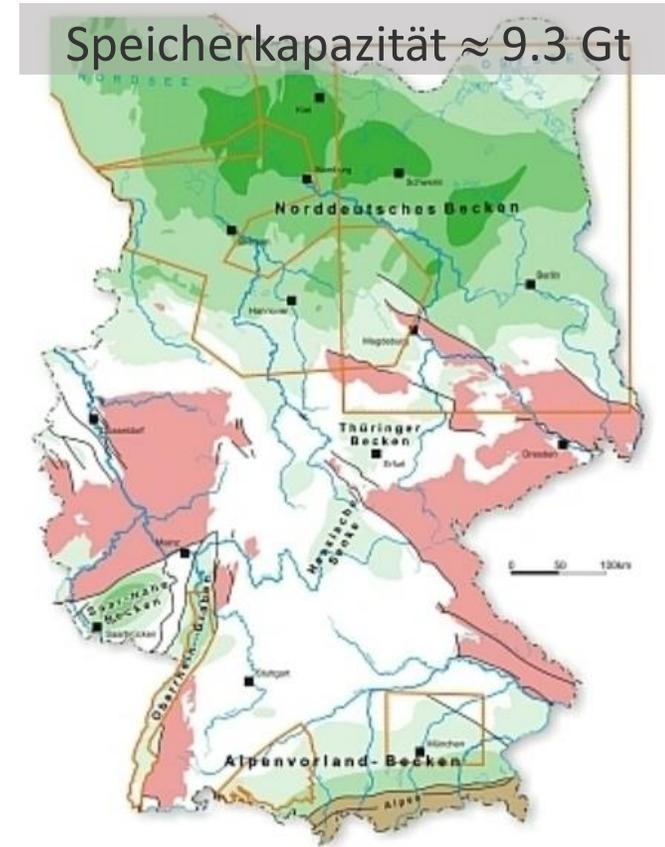
- Sedimentbecken mit salinaren Aquifere
- Kraftwerke und andere bedeutende CO₂-Quellen
- Nicht geeignet
- Erdgasfelder

in Deutschland



Tiefe saline Aquifere

Speicherkapazität ≈ 9.3 Gt



- Untersuchungsgebiete
 - Regionen mit Speichermöglichkeiten
 - Regionen ohne bedeutende Speicher-möglichkeiten
- Regionen mit Speichermöglichkeiten

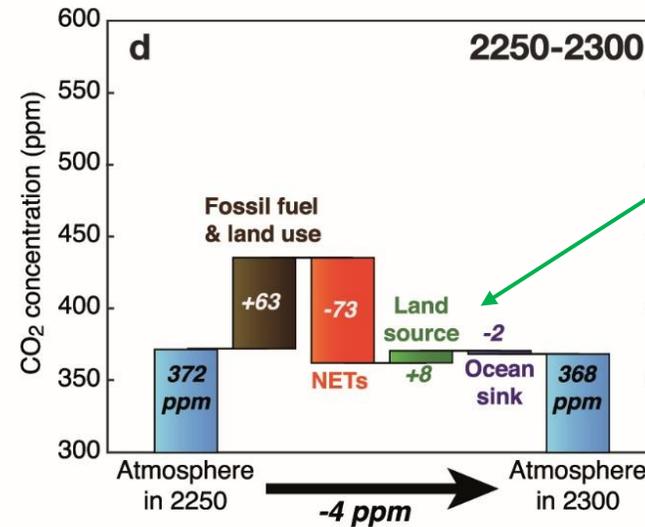
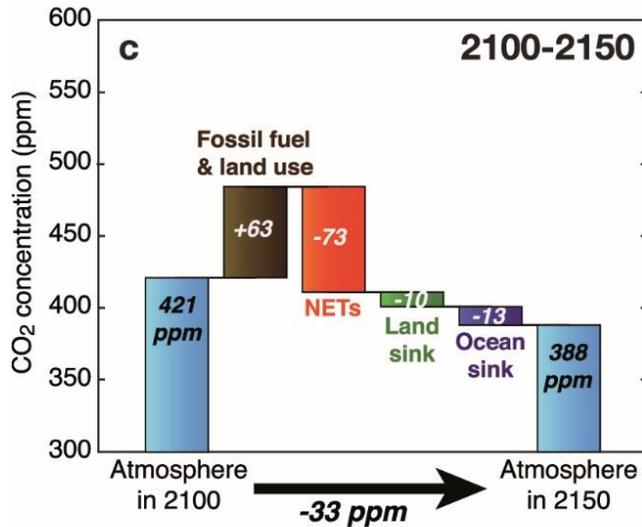
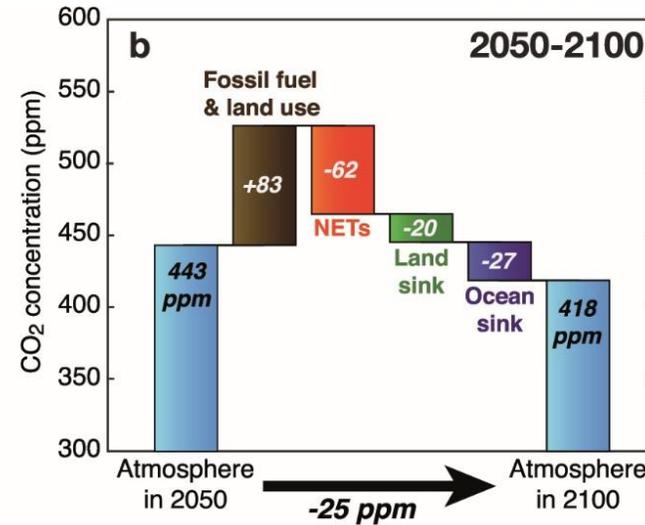
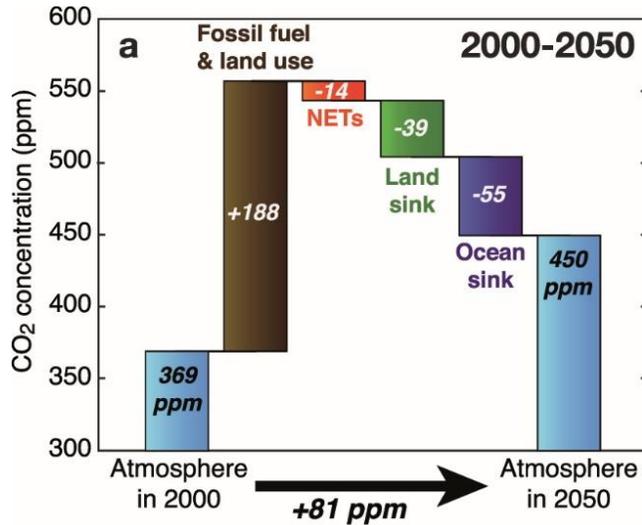
 - 1km
 - 3km
 - 5km
 - 7km
 - 9km
 - 10km

tiefliegende und
Salzwasser führende
Speichergesteine (Aquifere)

Regionen ohne bedeutende Speicher-möglichkeiten

 - Grundgebirge
 - Speichergesteine nicht oder
in zu geringen Tiefen vorhanden

Mögliche Auswirkungen von CCS auf den globalen Kohlenstoffkreislauf und Klima bis 2300



Da sich die Aufnahmekapazität von natürlichen CO₂-Senken in Zukunft deutlich ändern könnte, sind die Anforderungen an **Negative Emission Technologies** (NETs) schwer abzuschätzen

Der **Aufhebung der natürlichen CO₂-Senkenfunktion** durch einen Rückgang der atmosphärischen CO₂-Konzentration hebt zusammen mit den projizierten CO₂-Emissionen die Abnahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration um 2300 fast vollständig wieder auf.

(Jones et al., 2016)

Wichtige Implikationen von Climate Engineering-Maßnahmen

- Schwächung von Klimaschutzbemühungen, d. h. der Minimierung von Treibhausgasemissionen
- Unbekannte Klimaveränderungen werden ausgelöst
- Bisher monothematische Diskussion über die Abschwächung des Klimawandels, keine ganzheitliche Diskussion über regionale und globale Umweltveränderungen
- Nutzung erneuerbarer Energien wird durch mehrere Climate Engineering-Maßnahmen beeinträchtigt
- Maßnahmen können nach Beginn nicht ereignisbezogen (Notfall, Fehlentwicklung) beendet werden
- Wer entscheidet, was das optimale Klima ist, das angestrebt werden soll?

Quellenangaben

- IPCC-WGI-TS, 2021. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Technical Summary. Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jones, C.D., Ciais, P., Davis, S.J., Friedlingstein, P., Gasser, T., Peters, G.P., Rogelj, J., van Vuuren, D.P., Canadell, J.G., Cowie, A., Jackson, R.B., Jonas, M., Kriegler, E., Littleton, E., Lowe, J.A., Milne, J., Shrestha, G., Smith, P., Torvanger, A., Wiltshire, A., 2016: Simulating the Earth system response to negative emissions. *Environ. Res. Lett.* 11, 095012.
- Lenton, T.E., Vaughan, N.E., 2009: The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 9, 2559-2608 .
- Lowe, J.A., Huntingford, C., Raper, S.C.B., Jones, C.D., Liddicoat, S.K., Gohar, L.K., 2009: How difficult is it to recover from dangerous levels of global warming? *Environ. Res. Lett.* 4, 0140122.
- Reynolds, J.L., 2019: Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proc. R. Soc. A* 475: 20190255.
- Rickels, W., Klepper, G., Doern, J., Betz, G., Brachatzek, N., Cacean, S., Gussow, K., Heintzenberg J., Hiller, S., Hoose, C., Leisner, T., Oschlies, A., Platt, U., Proelß, A., Renn, O., Schaefer, S., Zürn, M., 2011: Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Kiel, in: <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>; 10.09.2012
- Wei, Y-M. et al., 2021: A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target. *Nature Climate Change* 11, 112-118