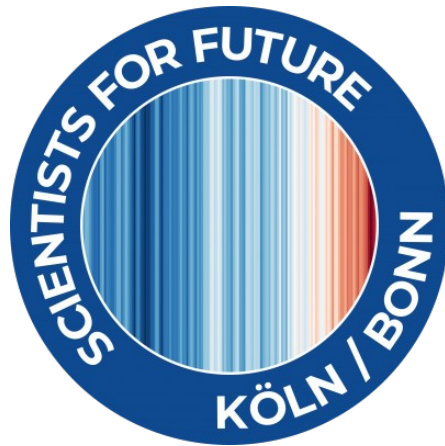
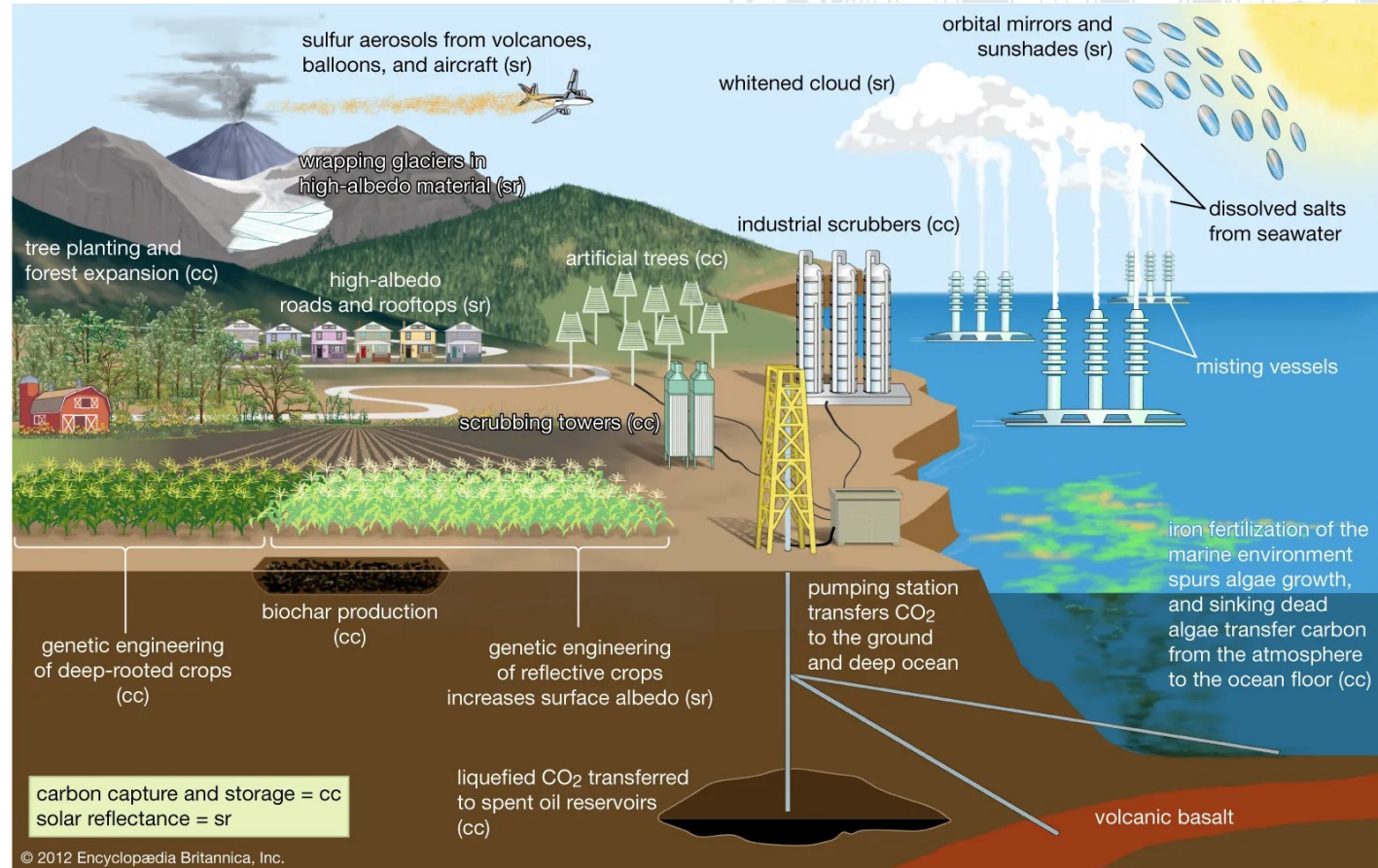


Geoengineering - Weg aus der Krise?

PD Dr. Volker
Ossenkopf-Okada



- Scientists4Future
Köln-Bonn
- Universität zu Köln



Definition

- Geo-Engineering
 - Nutzung wissenschaftlich-technischer Methoden um die Umweltbedingungen künstlich zu kontrollieren
 - Fokus in den letzten Jahren: Regulierung der Oberflächentemperatur der Erde um das Problem der Klimakrise zu lösen
- Nils Gustaf Ekholm (1901, Quarterly Journal of the Royal Met. Society):
 - “... it seems possible that Man will be able efficaciously to regulate the future climate of the earth and consequently prevent the arrival of a new Ice Age”



Geo-Engineering

- Frühe Anwendungen:
 - Karakum-Kanal
 - Ermöglichte effektive Landwirtschaft in Turkmenistan



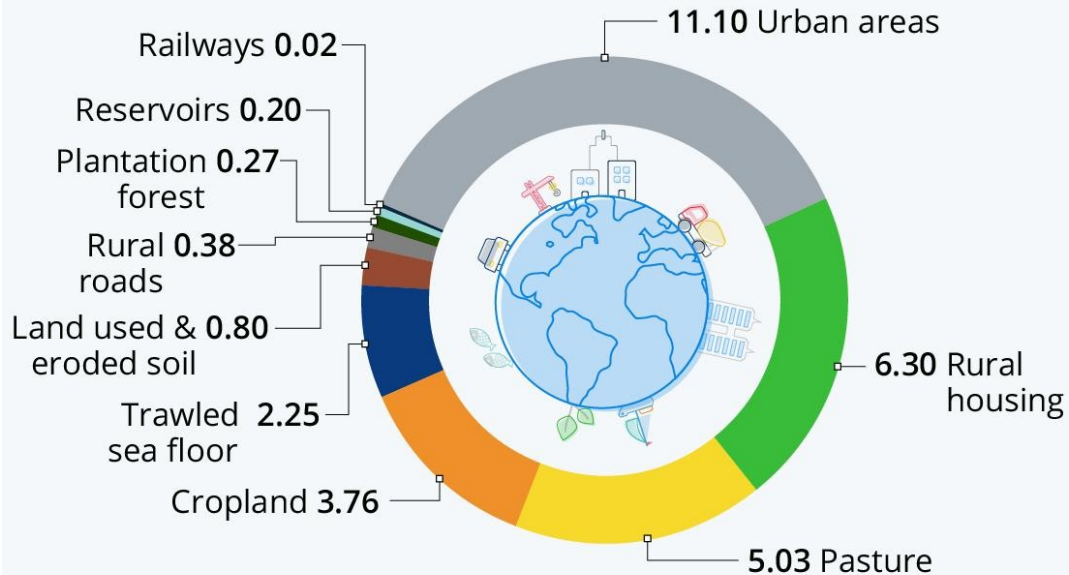
– “Tod” des Aral-Sees

- Umlenkung von Ob und Jennissee wegen erwarteter Klimafolgen schon in den 1960er Jahren aufgegeben

Anthropozän

- Unsere industrialisierten Anwendungen produzieren schon Geo-Engineering als Nebenprodukt

Estimated weight of human material output on Earth
(in trillion tonnes)



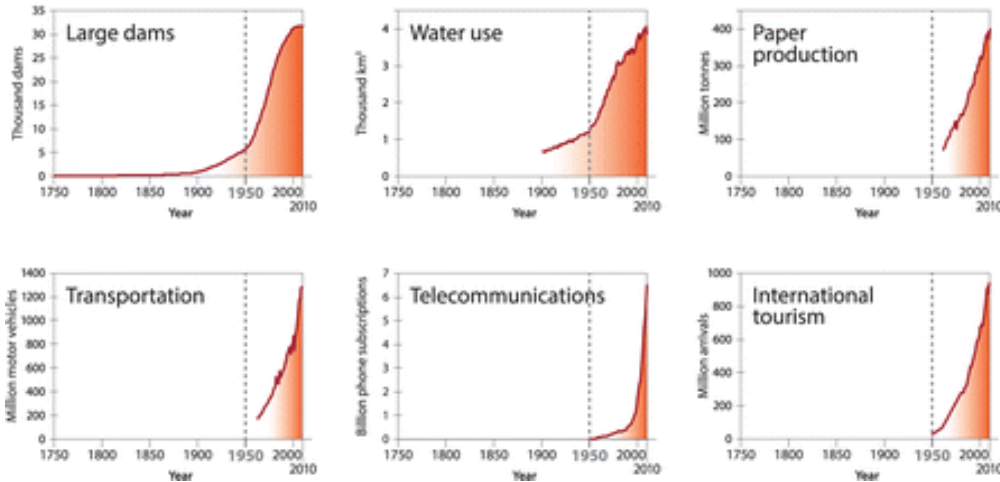
Source: The Anthropocene Review |
Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective



Kupferabbau im Tagebau bewegt Kubik-
kilometer Gestein (© V. Ossenkopf-Okada)

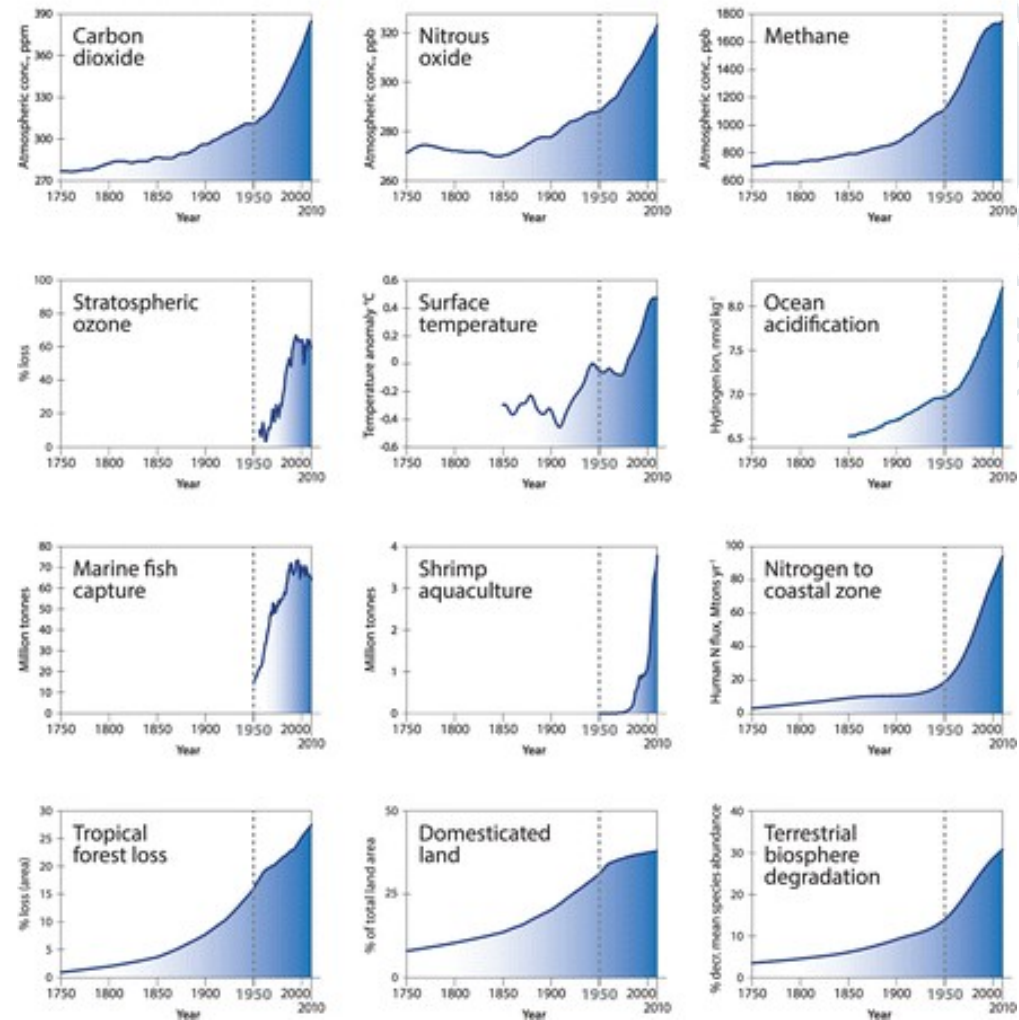
Anthropozän

- Wir gestalten die Erde praktisch schon so um, dass wir ihre materiellen Grenzen überschreiten



- Die Erderhitzung ist de-facto ein gigantisches Geo-Engineering-Produkt.

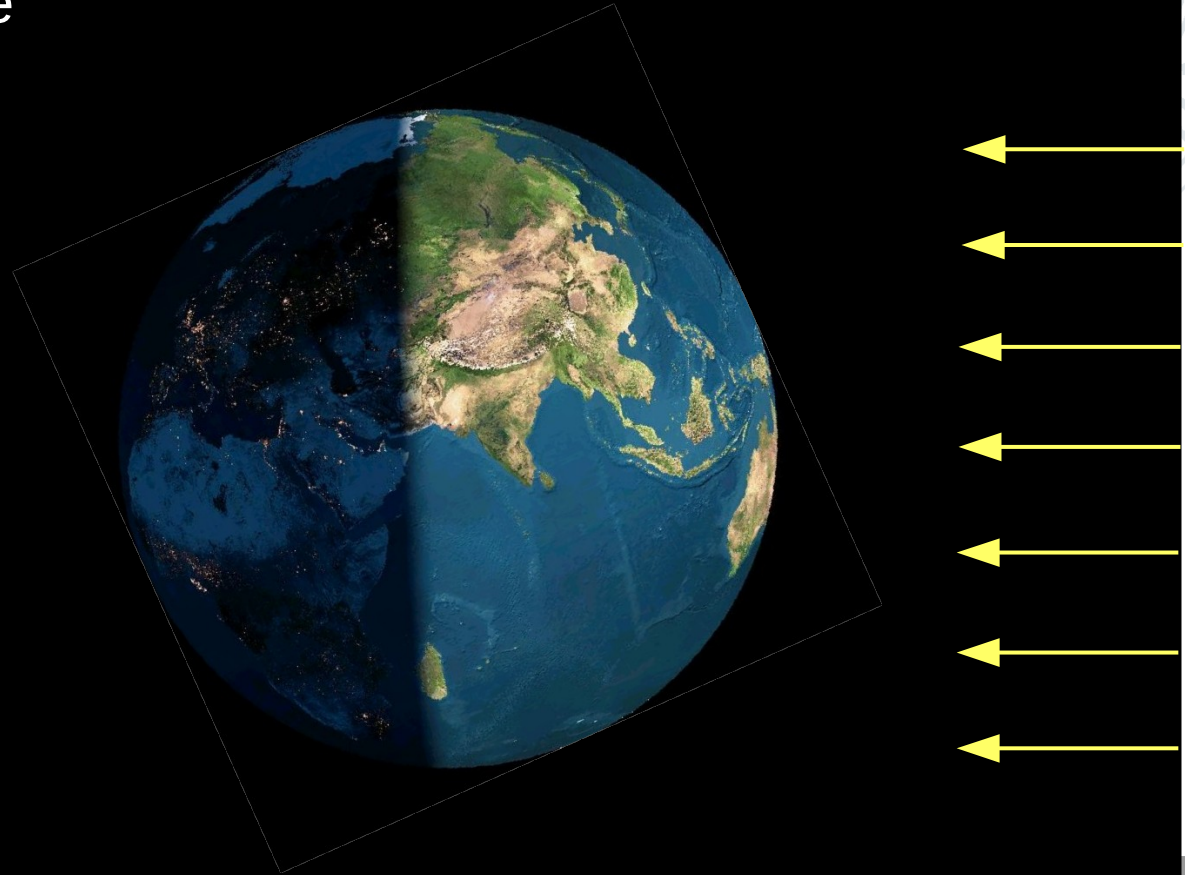
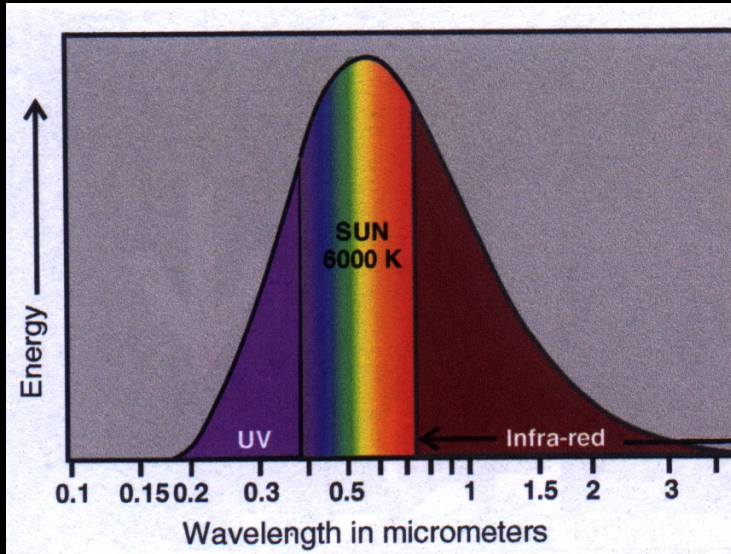
Earth system trends



Was ist das Problem? - Erderhitzung

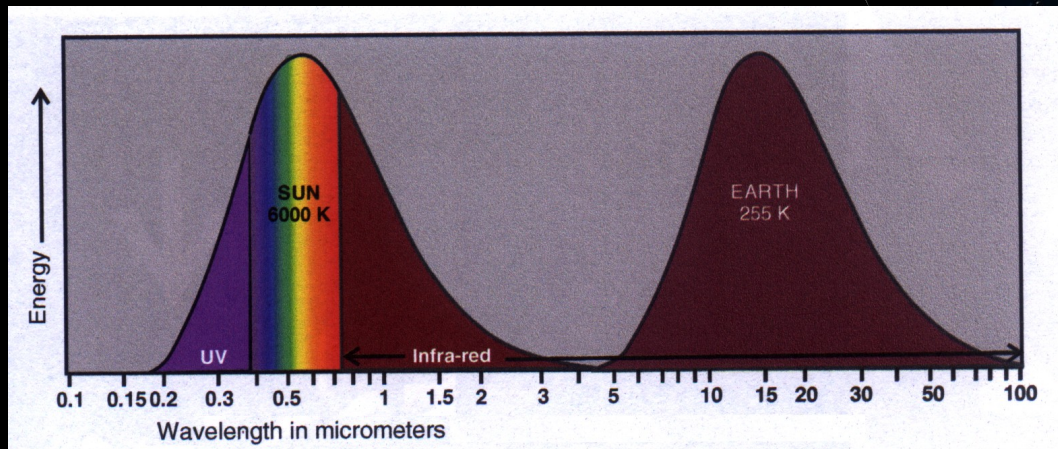
Energiebilanz

Input: Strahlung von der Sonne



Energiebilanz

Output: Abstrahlung ins All (infrarot)

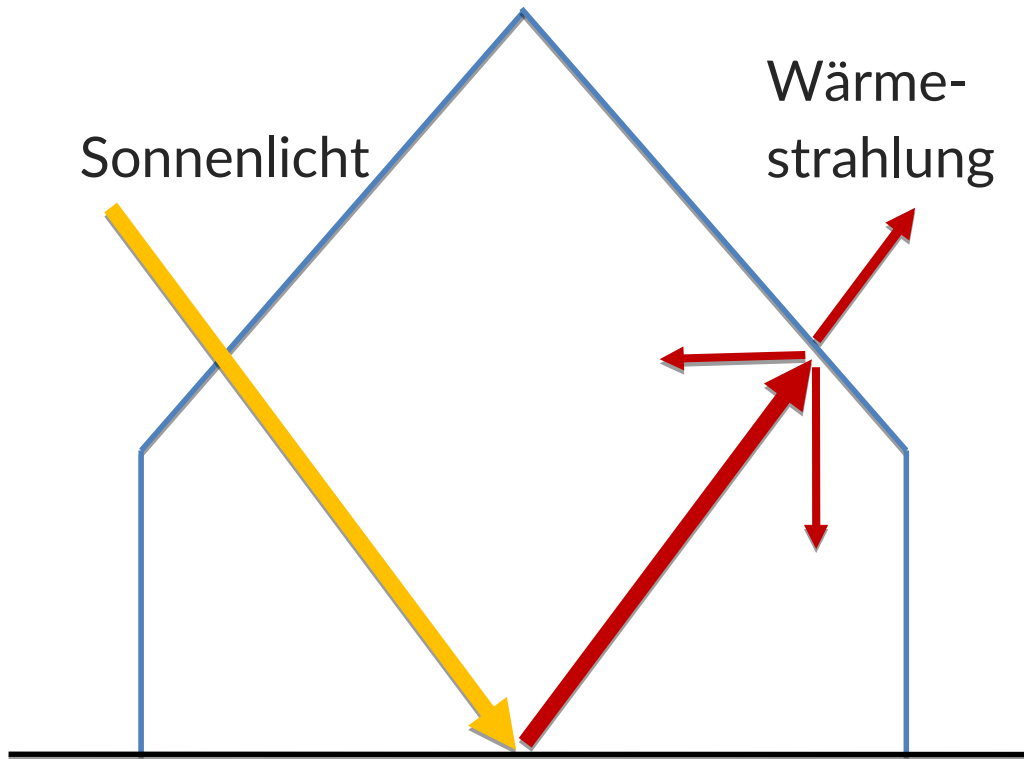


Ergebnis: -18°C

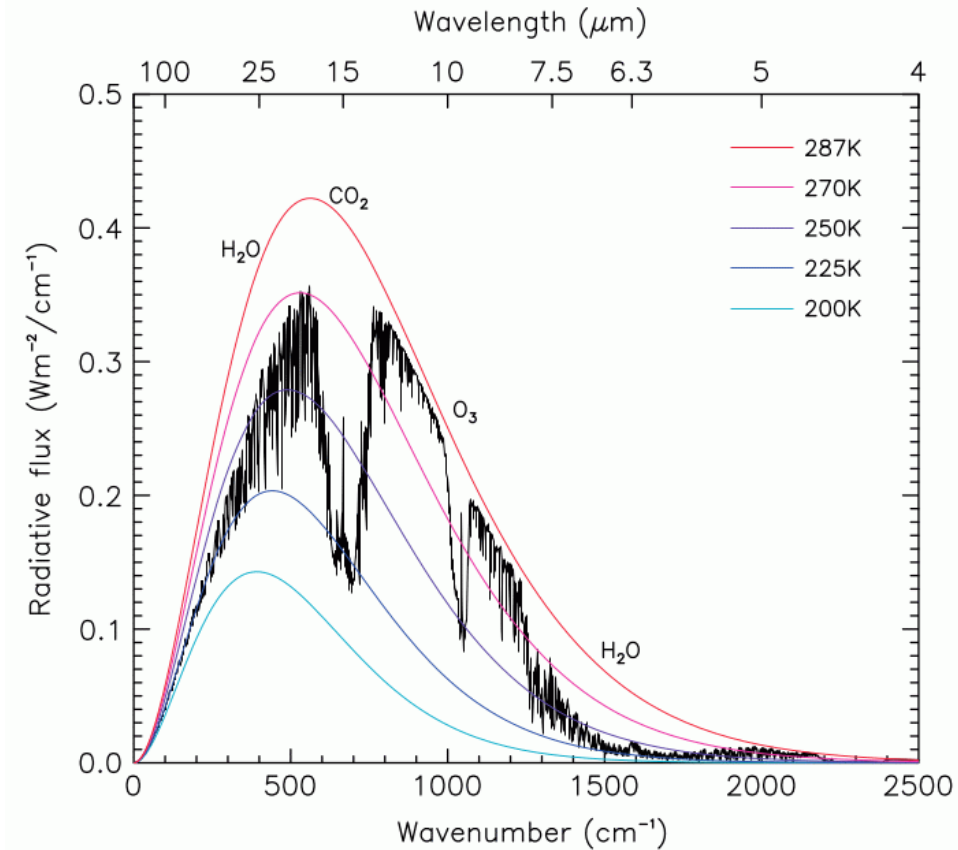
Der Treibhauseffekt

Abstrahlung reduziert

Tatsächlich nur bei einigen Wellenlängen:



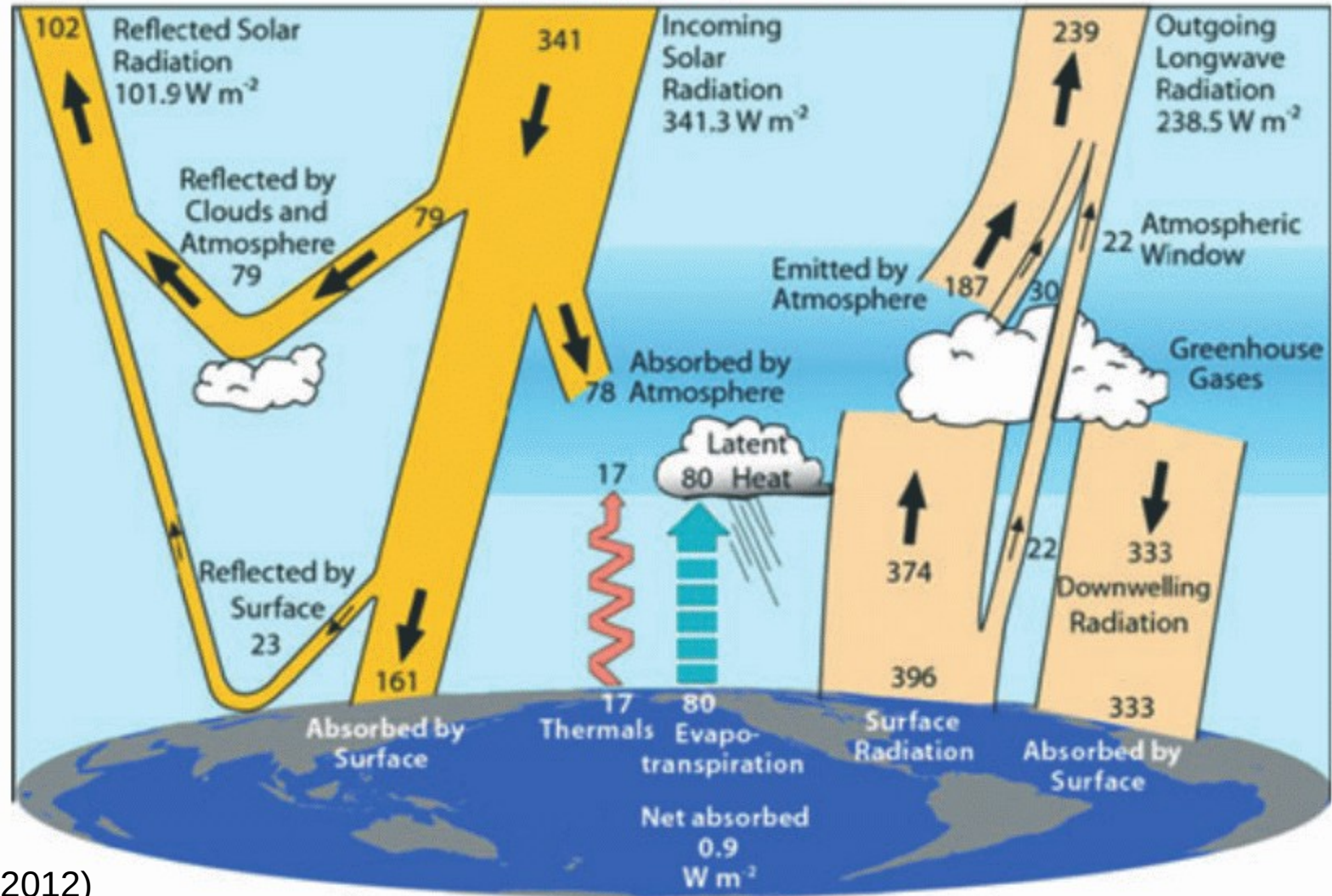
→ Es bleibt drinnen wärmer: 15°C



Zhong & Haigh (2013)

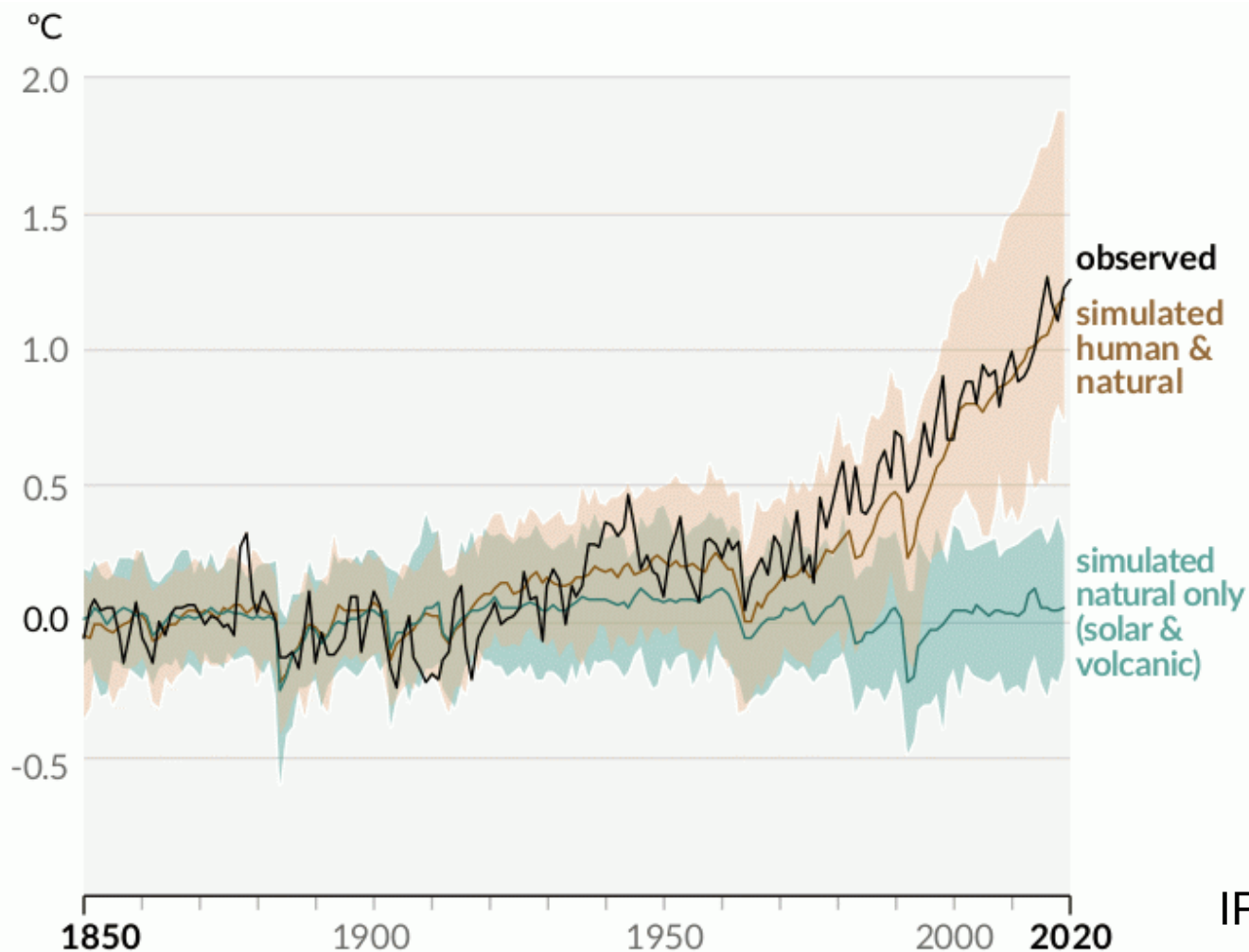
Gesamt- bilanz

Global Energy Flows $W m^{-2}$



Trenberth & Fasullo (2012)

Der menschengemachte Einfluss



Strahlungsbilanz erhöht um:

$$2.72\text{W/m}^2$$

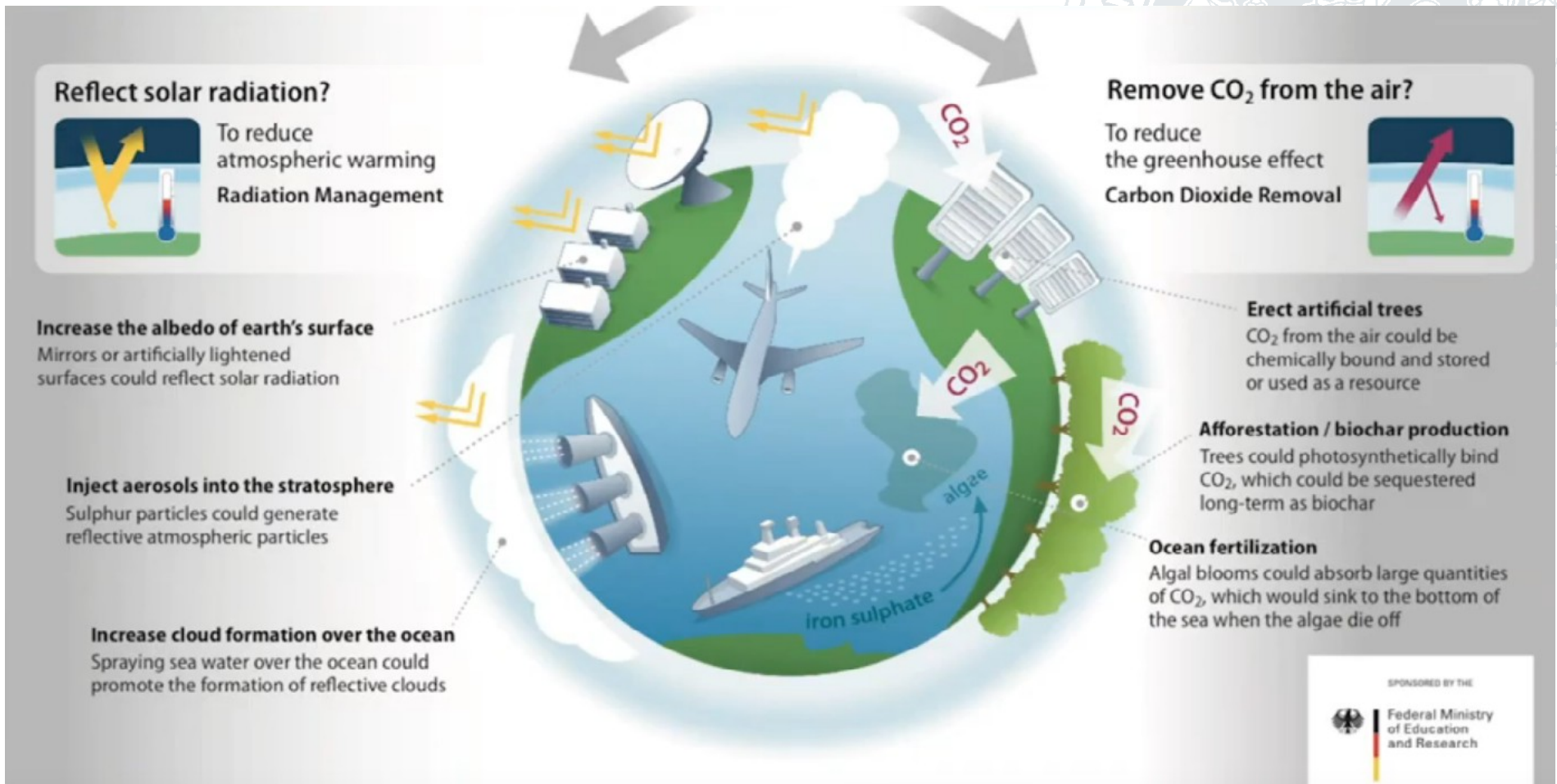
(=1.1%)

Erhöht die Oberflächentemperatur um:

$$1.1-1.2^\circ$$

IPCC AR6 (2021)

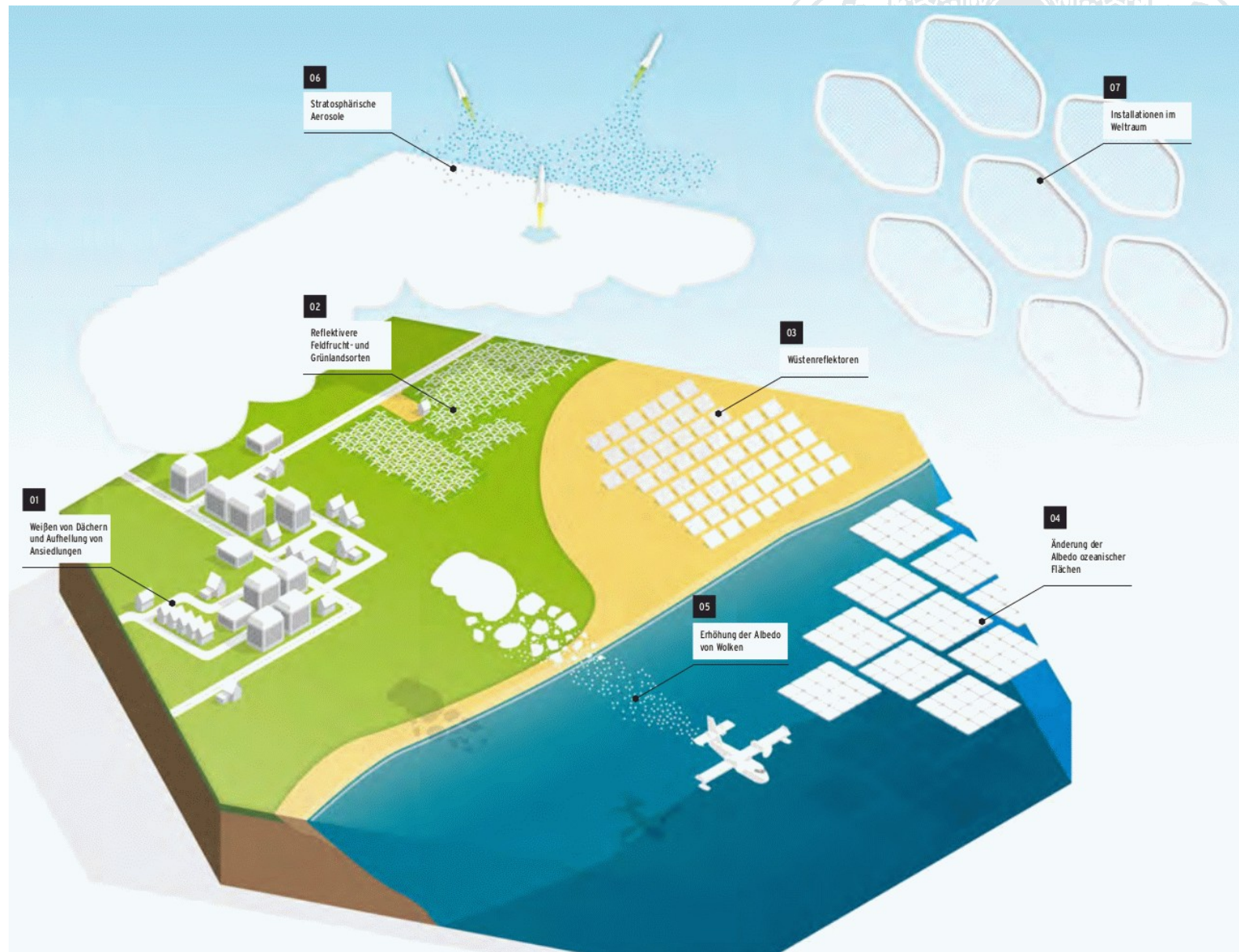
Lösungen



Kiel Earth Institute (2018)

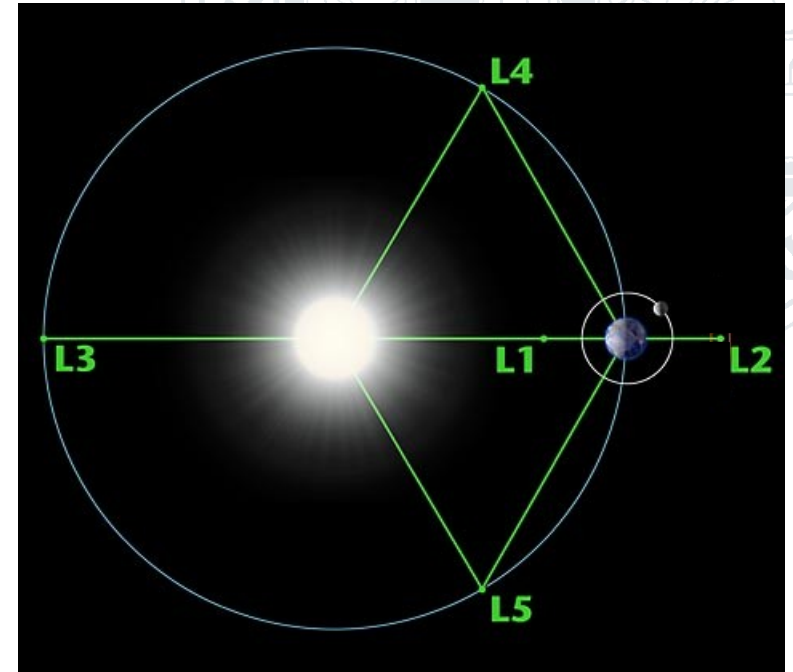
Solar Radiation Management (SRM)

Umweltbundesamt (2011)



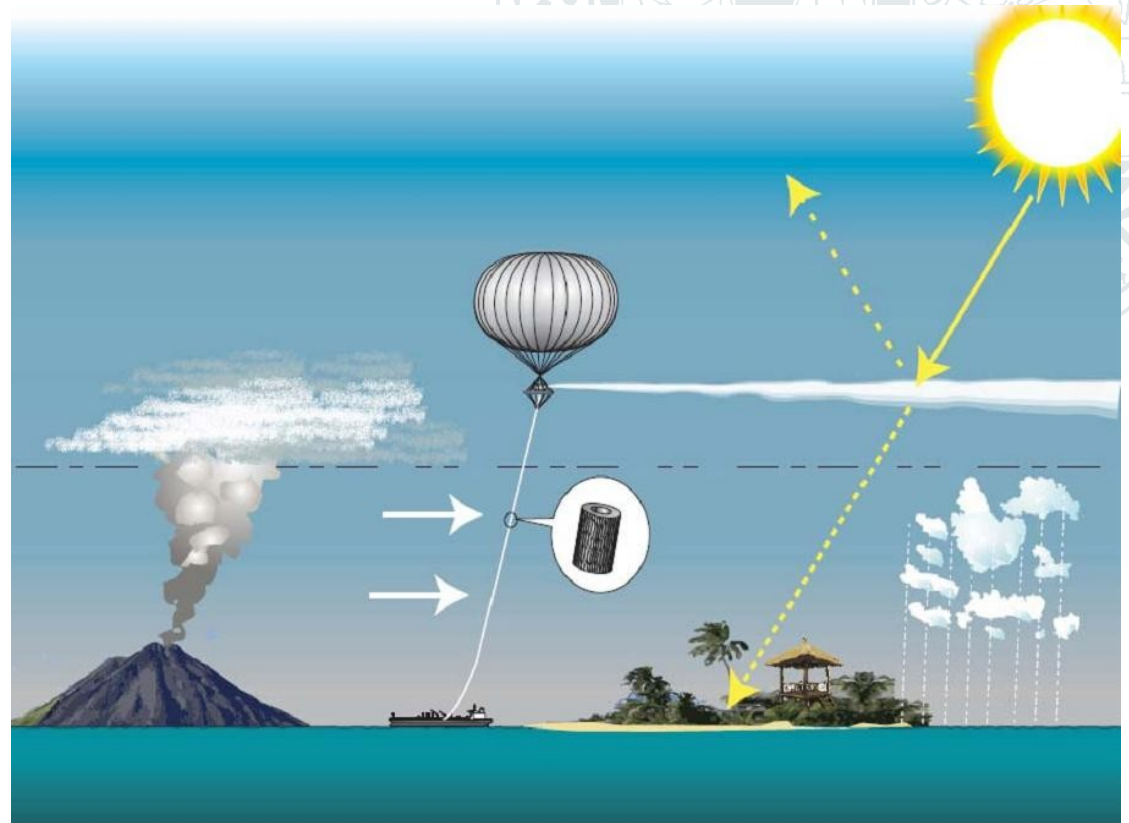
Solar Radiation Management

- Ziel: Absenkung der einfallenden Strahlung global um 1.1%
 - Reflektor im L1 (metastabiler Punkt):
 - Noch 3.5 mal näher an der Sonne wegen der Kraft des Strahlungsdrucks
 - Notwendige Größe: 21.4 Mio km²
 - Material: 14µm Mylar-Folie: 419 Mio t
 - Vergleich: JWST: 6.16t
- Alternative:
 - Tausende Reflektoren im Niedrigen Erdorbit (NEO) in der Ekliptik (23.5° Neigung)
 - Sonnenfinsternis aller paar Minuten – Biorhythmus von Mensch und Tier?
 - Änderung der globalen Zirkulation und Niederschlagsmuster



Künstliche Wolken

- Einbringen von schwefeliger Säure bzw. Schwefeldioxid in die Stratosphäre über dem Meer
 - Äquivalent zur Kühlung durch Vulkanausbrüche
 - Ozeanversauerung durch große Mengen H_2SO_3
 - Wirkt nur lokal
- **Grundsätzliches SRM-Problem:**
 - Maßnahmen müssen aktiv über viele Jahrhunderte aufrecht erhalten werden, um das menschengemachte CO_2 zu kompensieren.



SPICE-Konzept (2020)

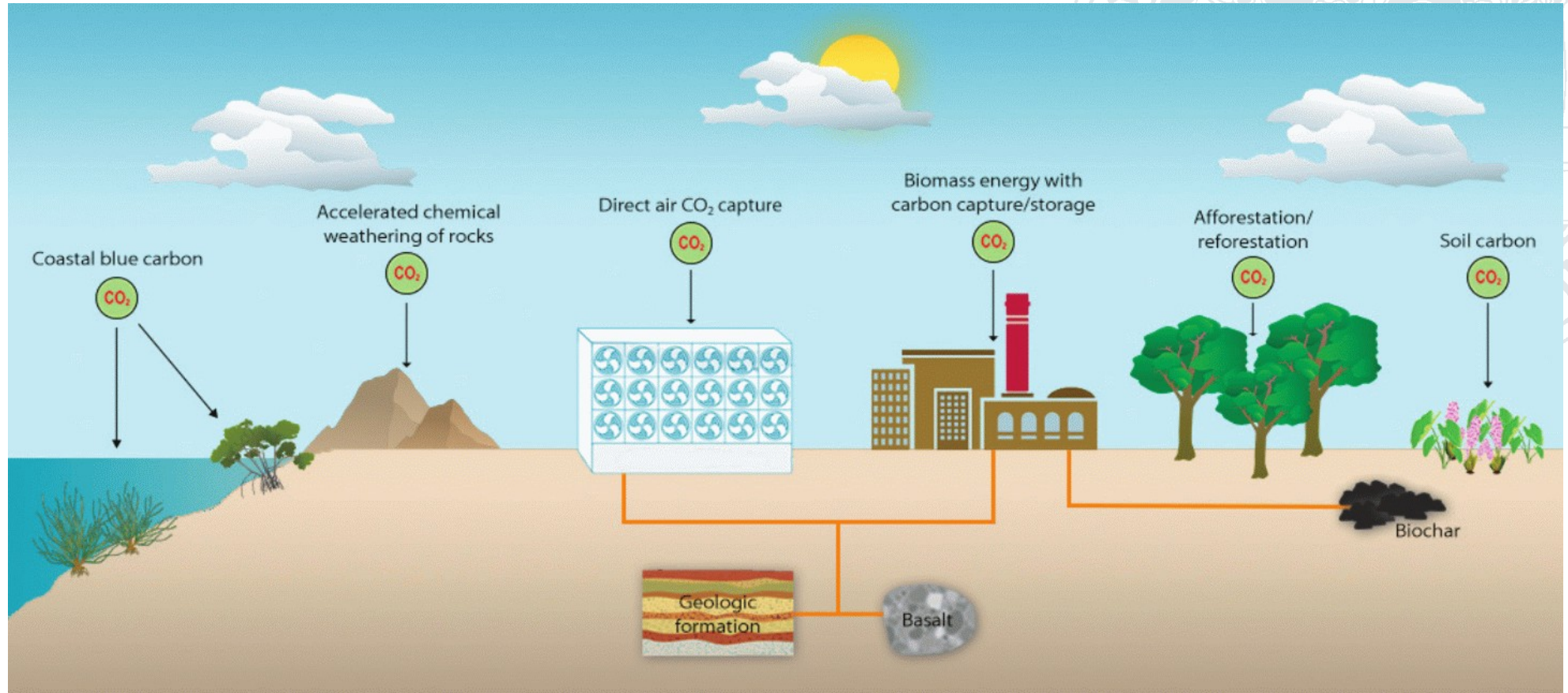
Aktive CO₂-Entfernung

Prinzip:

- **“Einsammeln”** (aus der Luft entfernen)
 - Durch pflanzliche Photosynthese
 - Durch Absaugen (Direct Air Capture)
 - Durch Bindung an große Oberflächen
- **“Verbuddeln”** (zurück in die Erdkruste)
 - Natürliche Einlagerung (z.B. in Mooren)
 - Gezielte Einlagerung von Biomasse
 - CO₂ in bestehende Hohlräume
 - Chemische Bindung im Boden
- Alternativ: CO₂ oder Biomasse wiederverwenden – kein Beitrag zur Entfernung

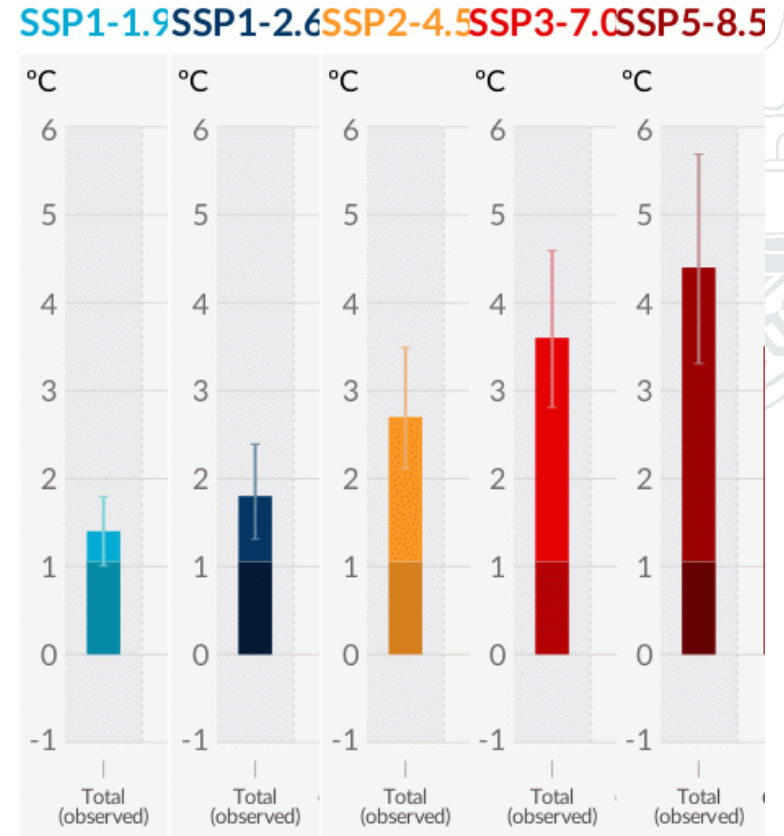
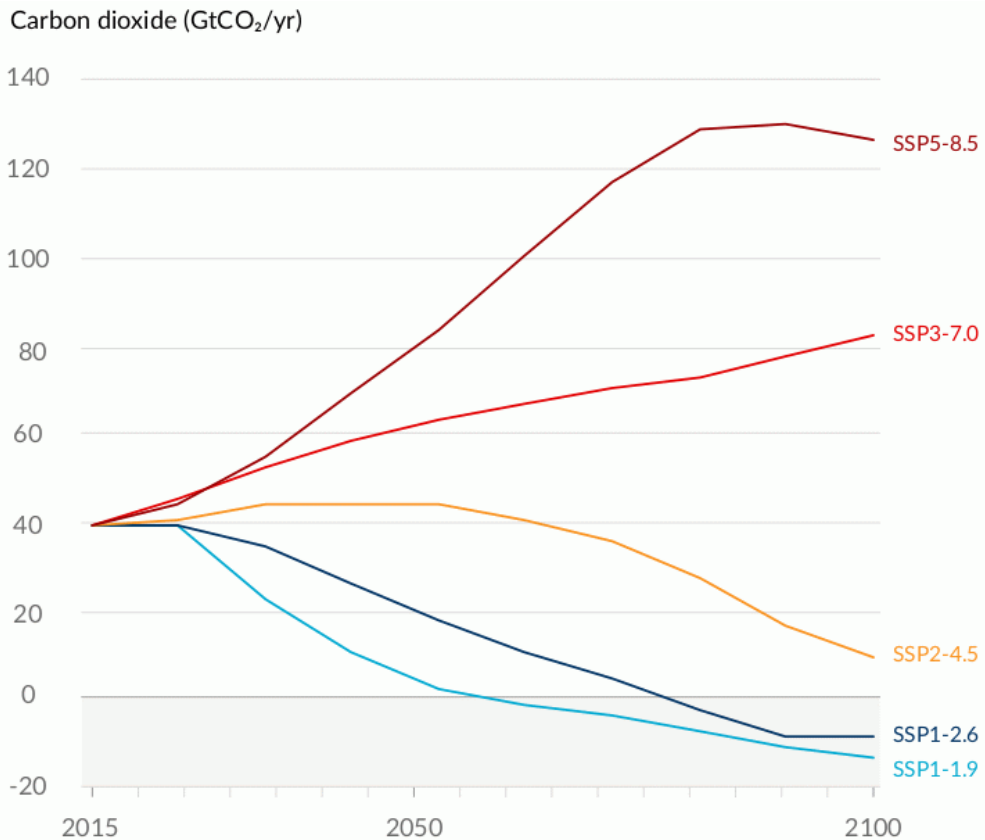


Aktive CO₂-Entfernung



National Academies of Sciences report: “Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda (2019)” (NAP-Report 2019)

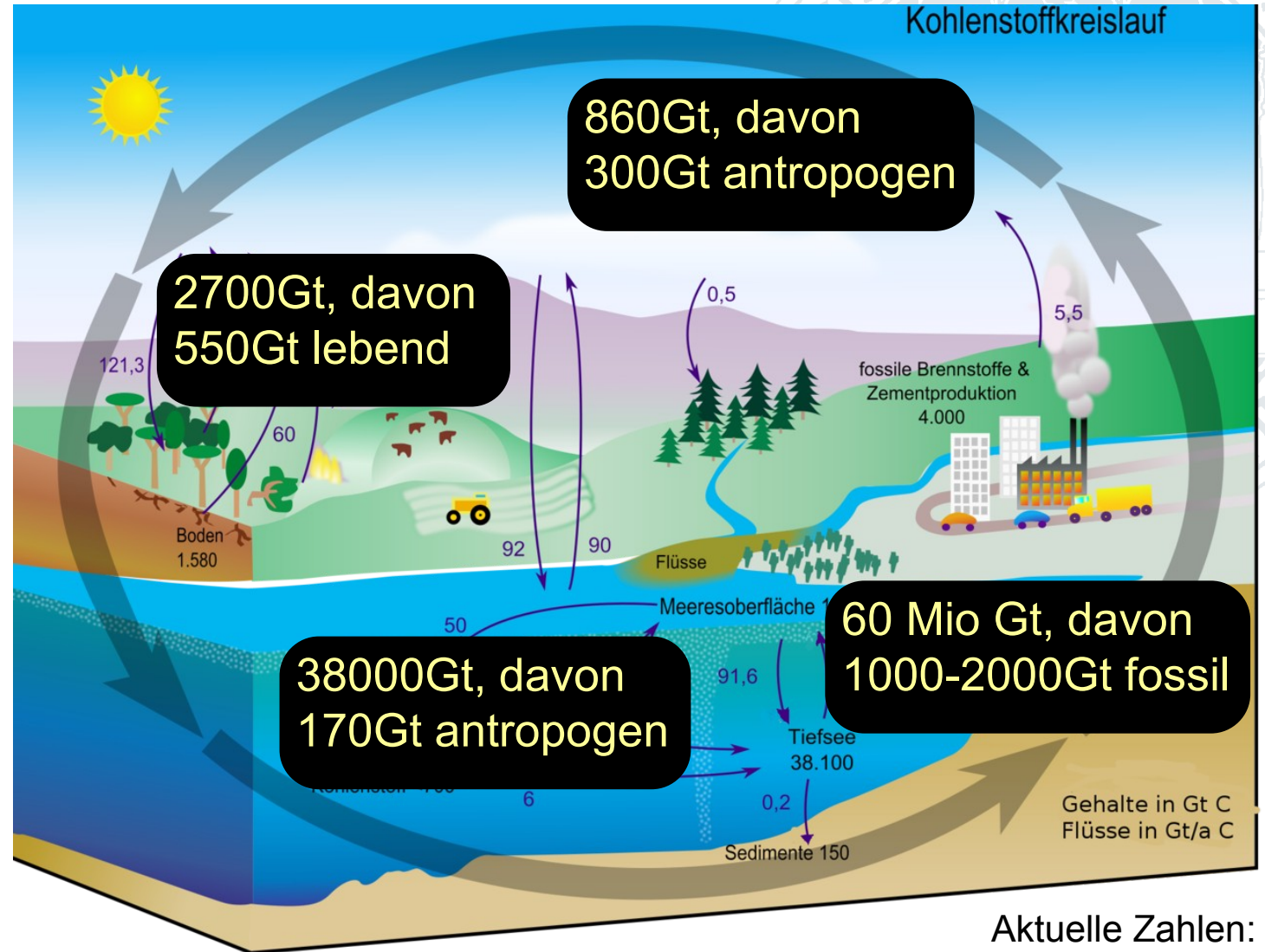
Aktive CO₂-Entfernung



Alle Entwicklungspfade, die im Jahr 2100 unter 2° Erderhitzung bleiben, erfordern signifikante negative Emissionen (CO₂ -Entfernung) (IPCC WG1 AR6 2021)

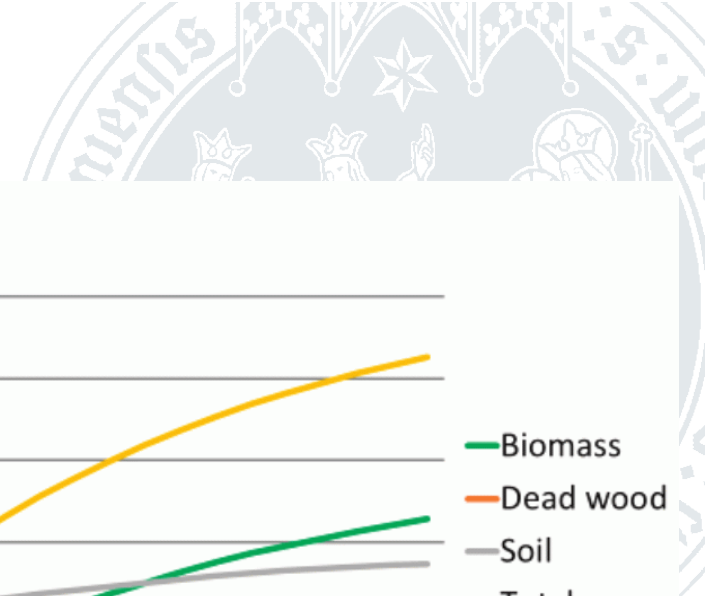
Der Kohlenstoffkreislauf

- Ein großer Teil des anthropogenen CO₂ wurde von den Ozeanen aufgenommen
- Das Speichervermögen sinkt mit der Temperatur



Aktuelle Zahlen:
Friedlingstein et al. (2020)

Aufforstung



- Beispiel: Buche
 - 9m³/ha/a
 - 1m³ = 1.25t CO₂
→ 12t CO₂/ha/a
 - Dauerhaft speicherbar:
max. 6t CO₂/ha/a
 - Kosten: 20-80\$/t(CO₂)
(Fuss et al. 2018)

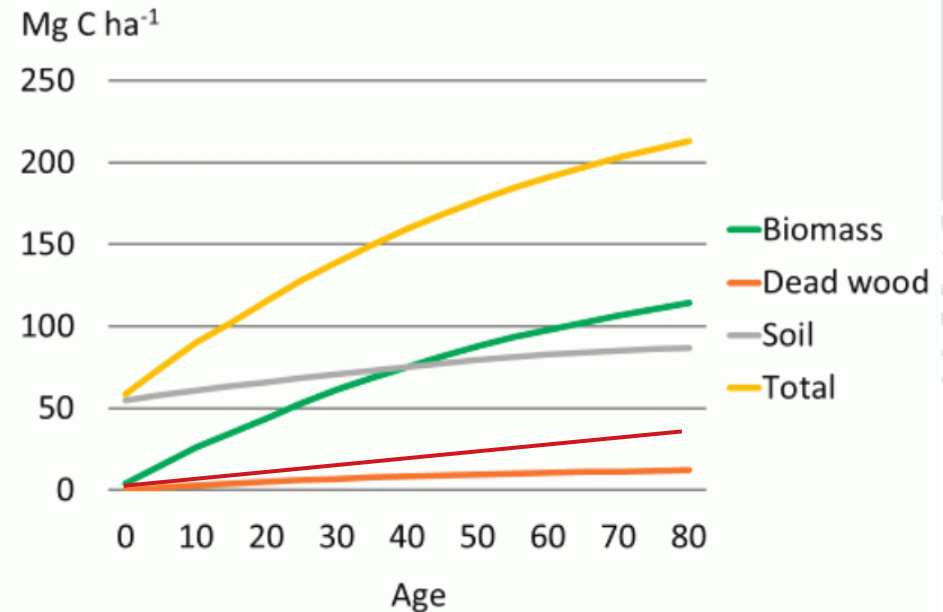
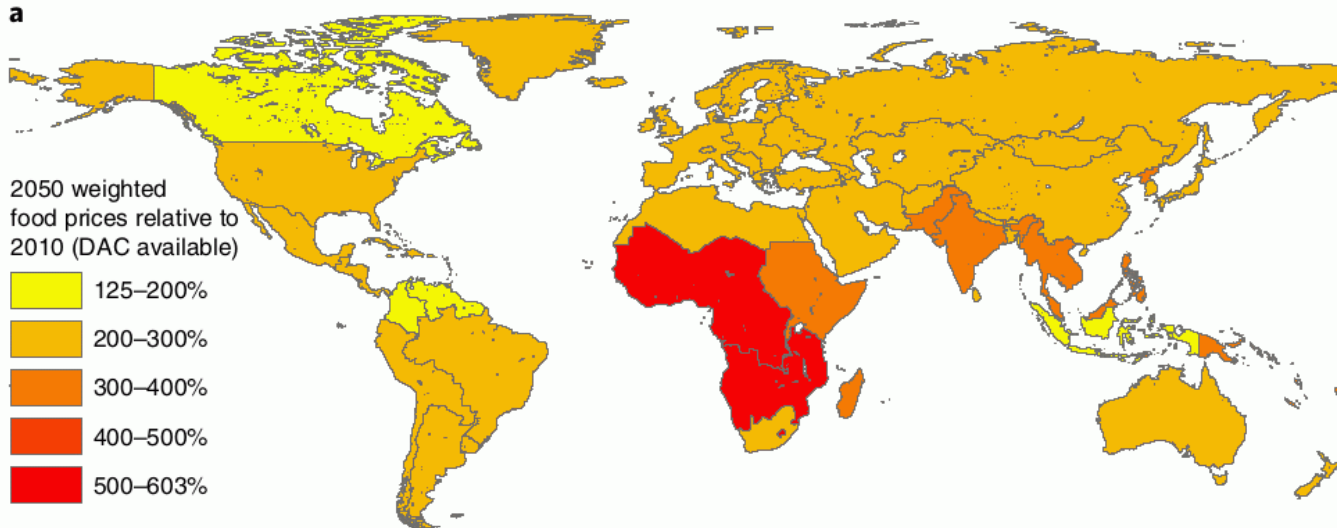
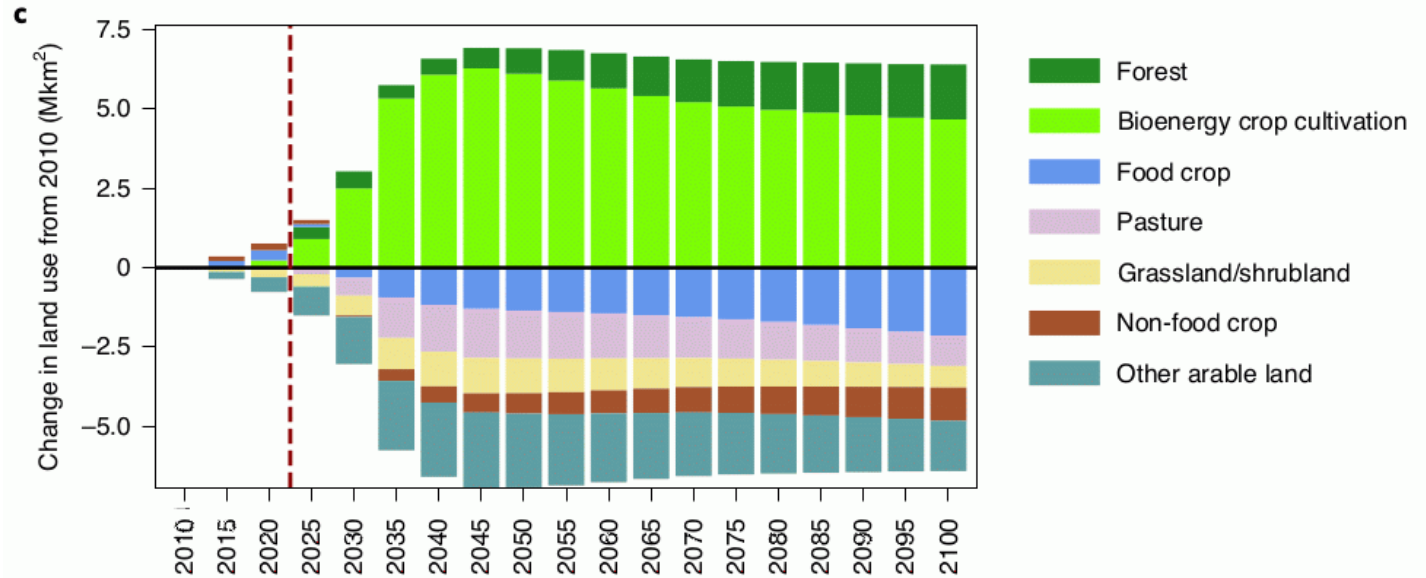


FIGURE 3.1 Changes in carbon stock from afforestation. (NAP-Report 2019)

- Vergleich:
 - Flug Frankfurt-Mallorca, 4 Personen: 2.77 t CO₂ → 0.25-0.5 ha
 - Deutschland: 900Mio t/a → 15 x Gesamtwaldfläche
- Global aufforstbar: 2.5t(CO₂)/a, aktuelle Emissionen ~50t(CO₂)/a

Problems

- Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion



Projektion beim Umstieg auf 1.5°-kompatiblen Entwicklungspfad 2022 (Fuhrmann et al. 2020)

Probleme

- Permanenz
 - Wald muss mindestens 80 Jahre ungestört wachsen



- Selbst in Deutschland nicht garantierbar
 - “Waldsterben” wegen zunehmender Trockenheit

Positive Nebeneffekte

- Win-win-Strategien:
 - Erhaltung von Biodiversität
 - Einbeziehung der lokalen Bevölkerung
 - Entwicklungsmöglichkeiten vor Ort
 - Allerdings of nicht umgesetzt



myclimate



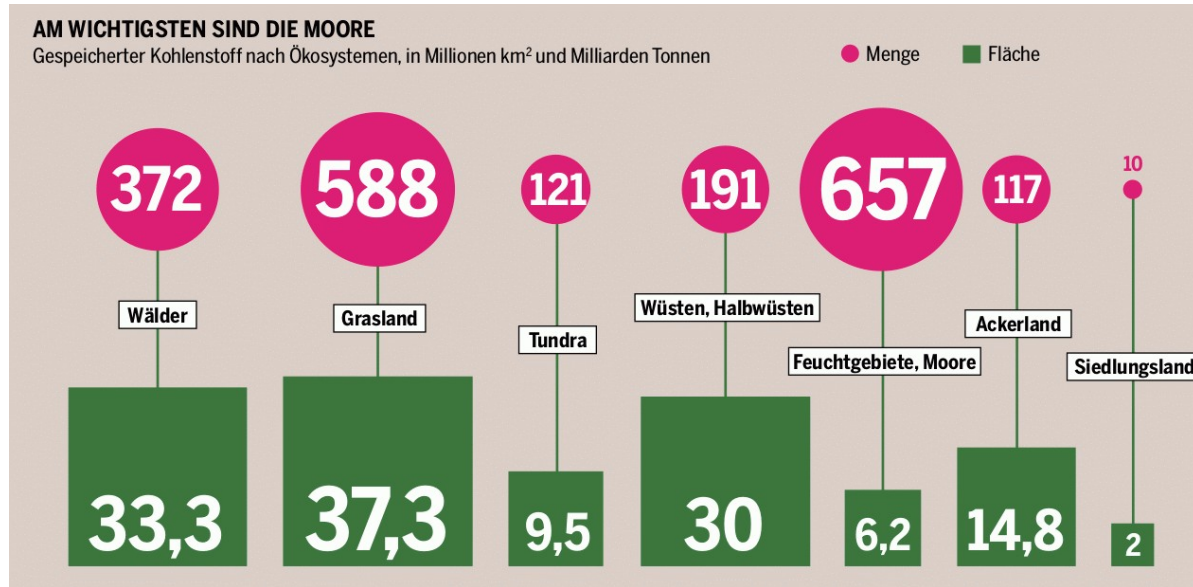
Probleme der Aufforstung

- Vorabfinanzierung ohne garantierten Erfolg
 - Permanenz im globalen Süden noch viel schwieriger
 - Rebound-Effekte → Abholzung woanders
 - Maßnahmen nicht zusätzlich, sondern nur extern finanziert (Additionalität)
- Menschenrechtsverletzungen bei Implementierung
 - Beispiel: Vertreibungen in Uganda (trotz “Gold-Standard”-Zertifizierung)



Alternativen

- Moore und Wiesen sind effizienter als Wälder
 - Wälder müssen anders genutzt werden



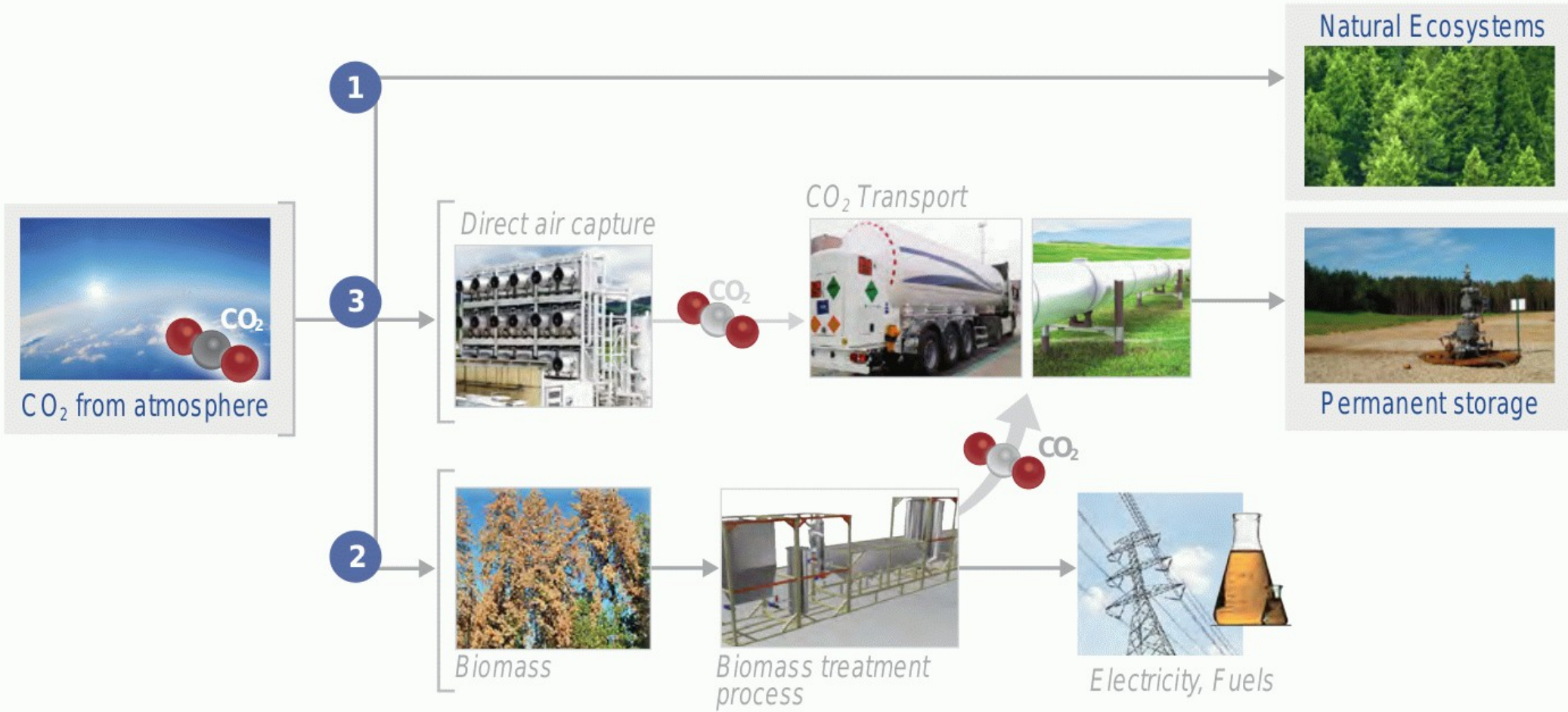
Lal (2015)

Baker et al. (2020)

Intervention Type	Increased Sequestration by 2045 (MtCO ₂ e)	Cost (\$/tCO ₂ e)	Source
Reforestation	46.0	16.4	USDA NRCS EQIP [10], Next10 [11]
Tidal marsh restoration	12.1	79.0	Zentner et al. [12]
Freshwater wetland restoration	3.0	440.5	Zentner et al. [12]
Grassland restoration	1.4	72.5	UC ANR Publication 8575 [13]
Changes to forest management	227.8	0.8	Galik et al. [14]

MtCO₂e = million tons of CO₂ equivalent

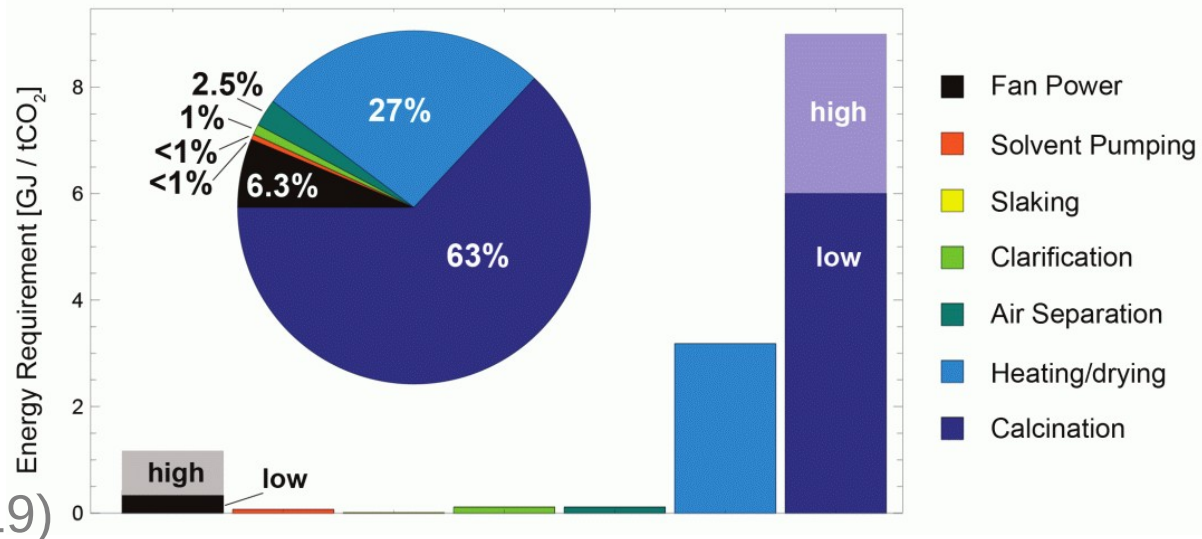
Andere Wege



Baker et al.: Getting to Neutral - Options for Negative Carbon Emissions in California (2020)

Direct air capture (DAC)

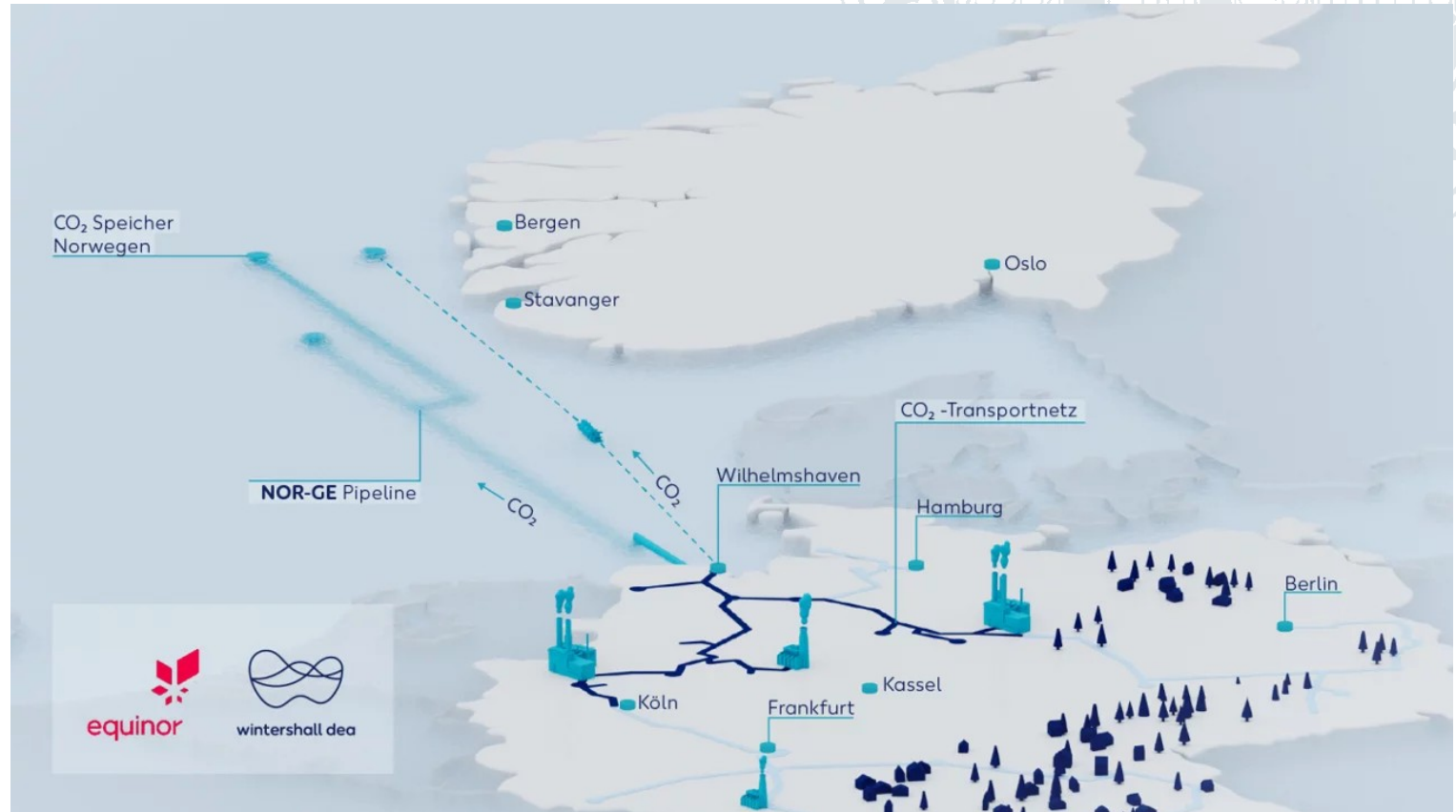
- Kosten:
150-300\$/t(CO₂)
(Fuss et al. 2018)
- Energiebedarf:
9.9-14 GJ/t(CO₂)
 - davon 1.5 GJ als Heizwärme weiter nutzbar
 - Vergleich: Aktuell werden für 9.9GJ 1.1t(CO₂) produziert (deutscher Strommix)



NAP-Report (2019)

Speicherung

- Erdgaslagerstätten wiederbefüllen
 - Braucht neue Pipelines, Erdgasleitungen nicht in Gegenrichtung nutzbar
 - Neues Geschäftsmodell für bisherige Gaskonzerne?

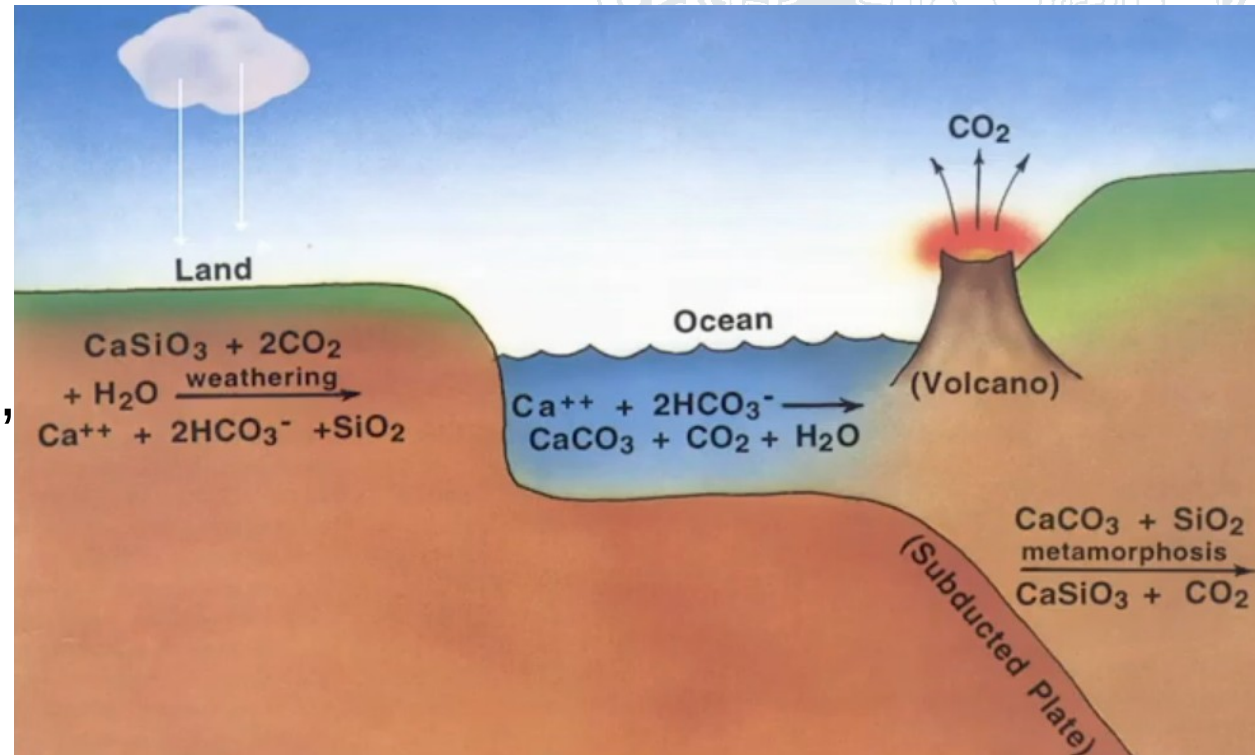


Equinor-
Planung

Natürlicher Prozess: Der Silikat-Karbonat-Zyklus

Zusammen mit Wasser werden Silikate in Karbonate umgewandelt

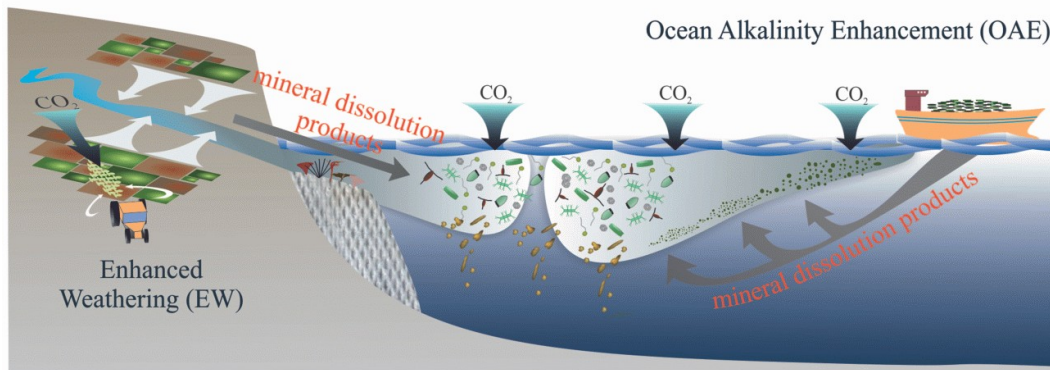
- Das CO_2 wird in Gestein gebunden.
- Zurück in die Luft durch Vulkane
- Gesamter Zyklus: ca. 500000 Jahre
- Schnellere Verwitterung, wenn es wärmer wird.
 - Geologischer Thermostat



Grinspoon (2020)

Beschleunigte Verwitterung

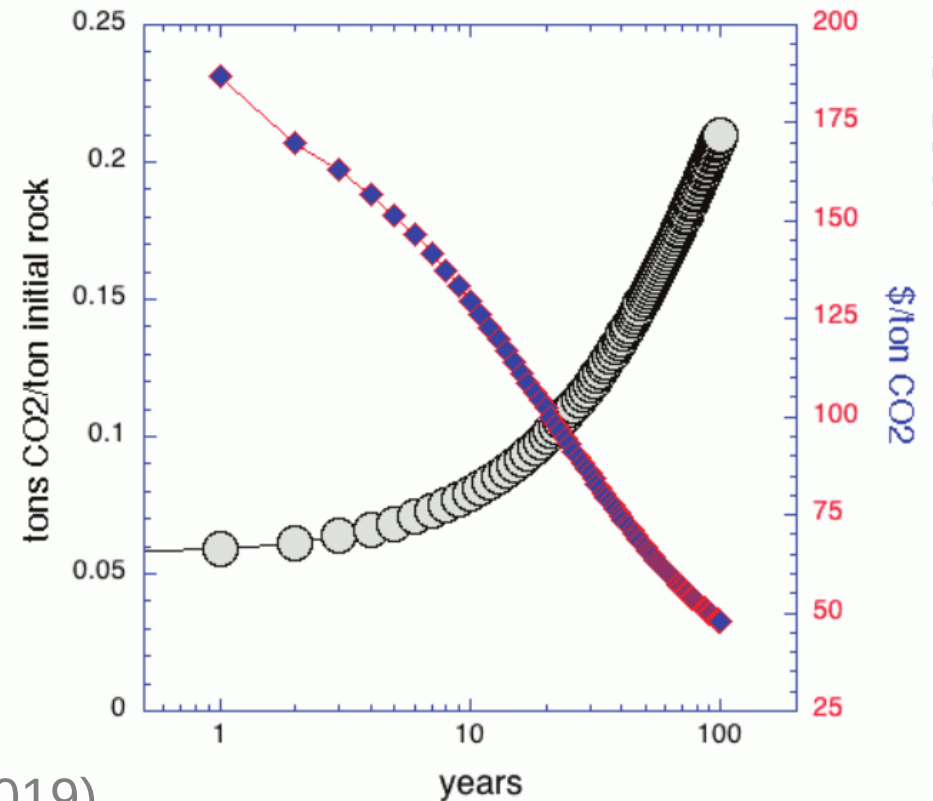
- $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaSiO}_3 + 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - Beschleunigung durch hohe Temperaturen und große Oberflächen
- Einziger skalierbarer Ansatz
 - Potential: $10^5 - 10^8 \text{ Gt}(\text{CO}_2)$
- Anwendbar für landwirtschaftliche Flächen und Küstengebiete



Travertine(CaCO_3)-Terrassen in heißen Quellen in Oman, NAP-Report (2019)

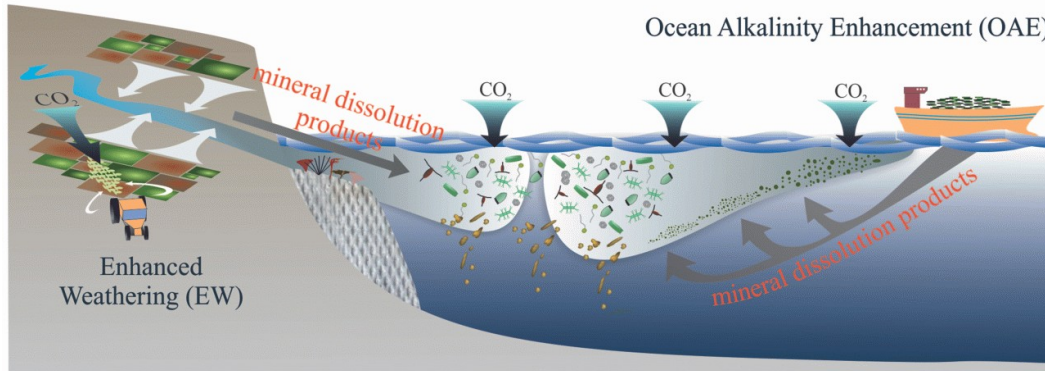
Beschleunigte Verwitterung

- Erfordert Zermahlen und Transport großer Mengen von Basalt
 - Begrenzt durch Transportkosten
 - Kosten: 150-200\$/t(CO₂)
 - Positiver Nebeneffekt:
Bodenfruchtbarkeit wird erhöht
 - Problem:
Risiko der Freisetzung großer Mengen von Schwermetallen



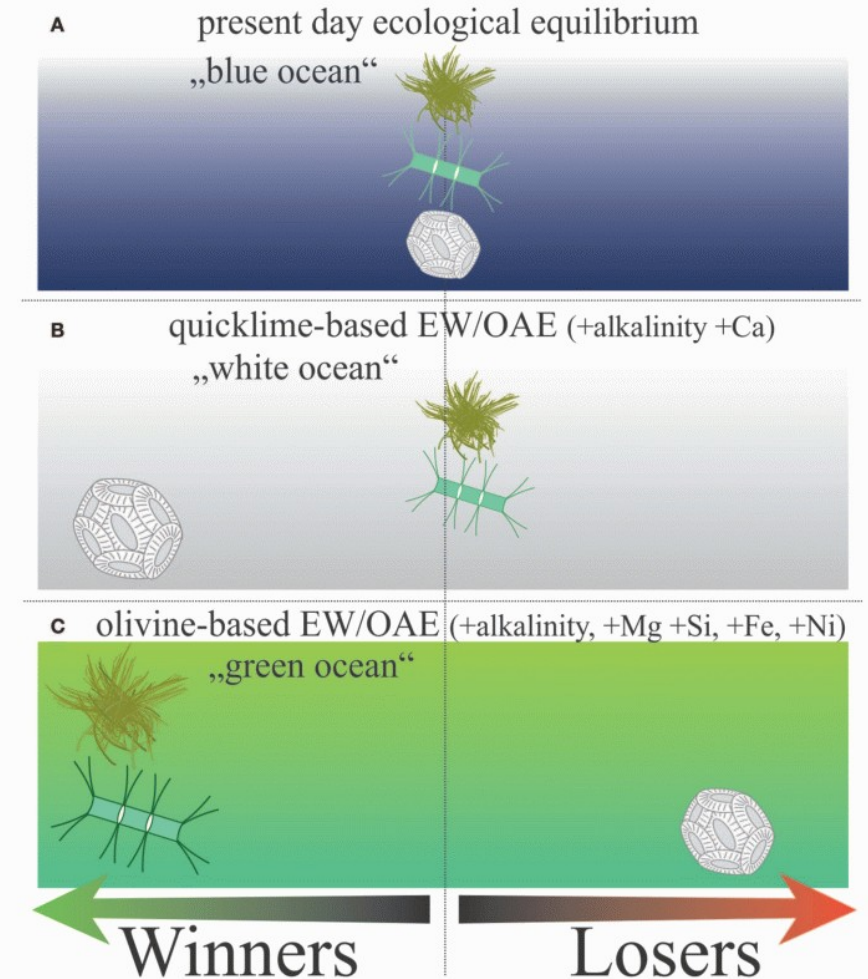
NAP-Report (2019)

Anwendung im Ozean



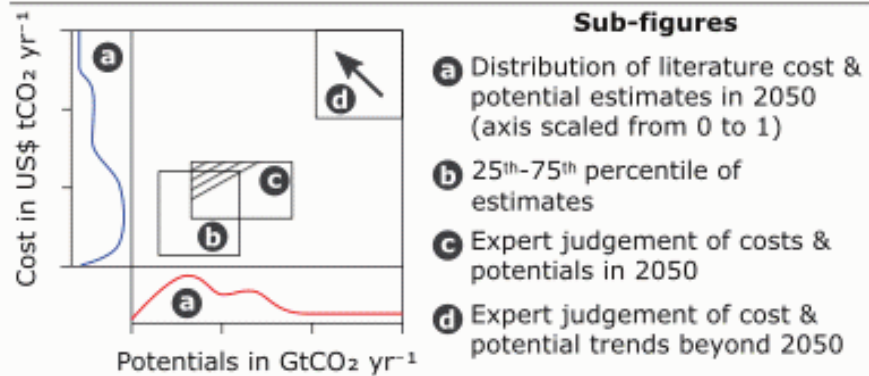
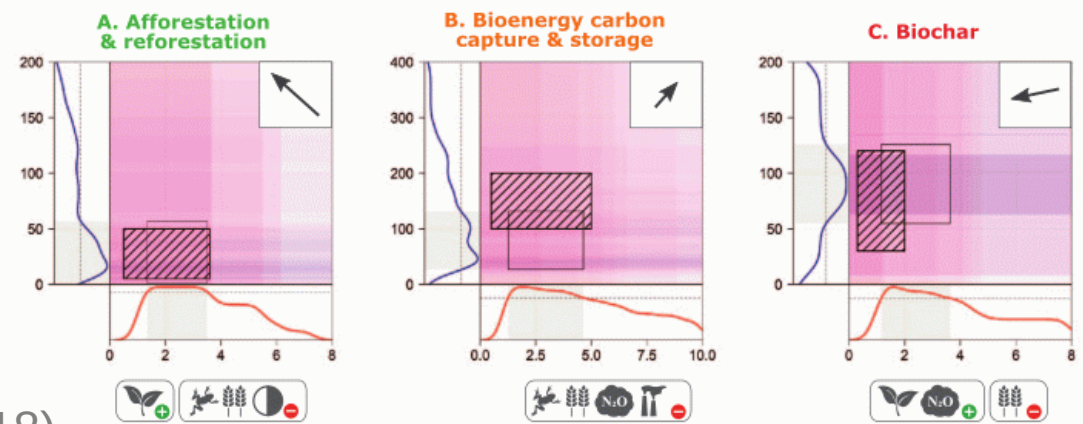
- **Erhebliche Änderung des Silikat-Karbonat-Gleichgewichtes**
 - Details abhängig von der Art des eingebrachten Gesteins

Bach et al (2019)



Für und wider der verschiedenen Technologien

Fuss et al. (2018)



Sub-figures

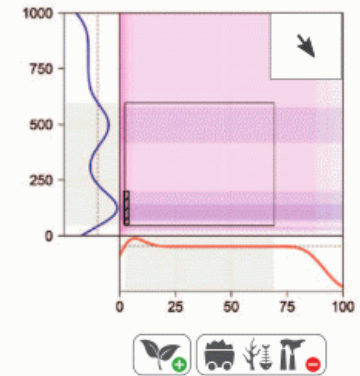
- a** Distribution of literature cost & potential estimates in 2050 (axis scaled from 0 to 1)
- b** 25th-75th percentile of estimates
- c** Expert judgement of costs & potentials in 2050
- d** Expert judgement of cost & potential trends beyond 2050

Side-effects

(+ positive, - risk of negative)

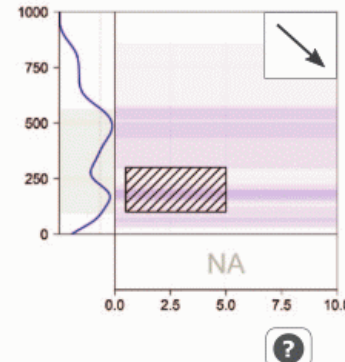
- Air pollution
- Albedo
- Biodiversity
- Ecosystem changes
- Food security
- Ground/water pollution
- Soil quality
- Mining and extraction
- Trace GHGs

D. Enhanced weathering

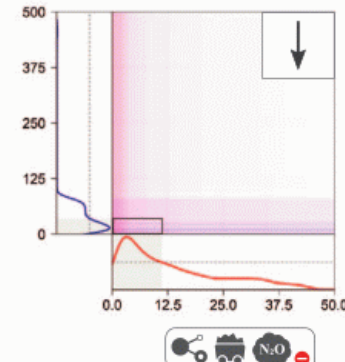


- CO₂-Emissionen vermeiden ist immer billiger
- Jede Technik hat negative Nebeneffekte

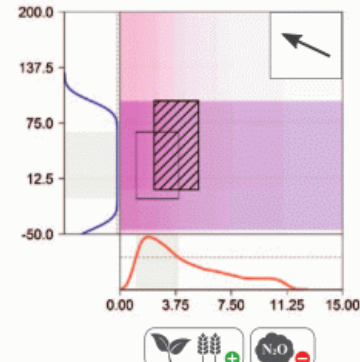
E. Direct air capture



F. Ocean fertilisation



G. Soil carbon sequestration



Das politische Dilemma

- Wir müssen als erstes die CO₂ -Emissionen reduzieren, aber daneben auch CO₂-Entfernungstechnologien entwickeln
- ↕
- Wenn wir die Technologien haben, werden sie von der Politik als Ausrede benutzt, die Emissionen nicht weiter zu reduzieren
 - Wir müssen künstliche CO₂-Speicher anlegen. Wie schafft man dafür Akzeptanz?
 - Wie kann man international CO₂-Einsparungen und CO₂-Entfernung belohnen?

