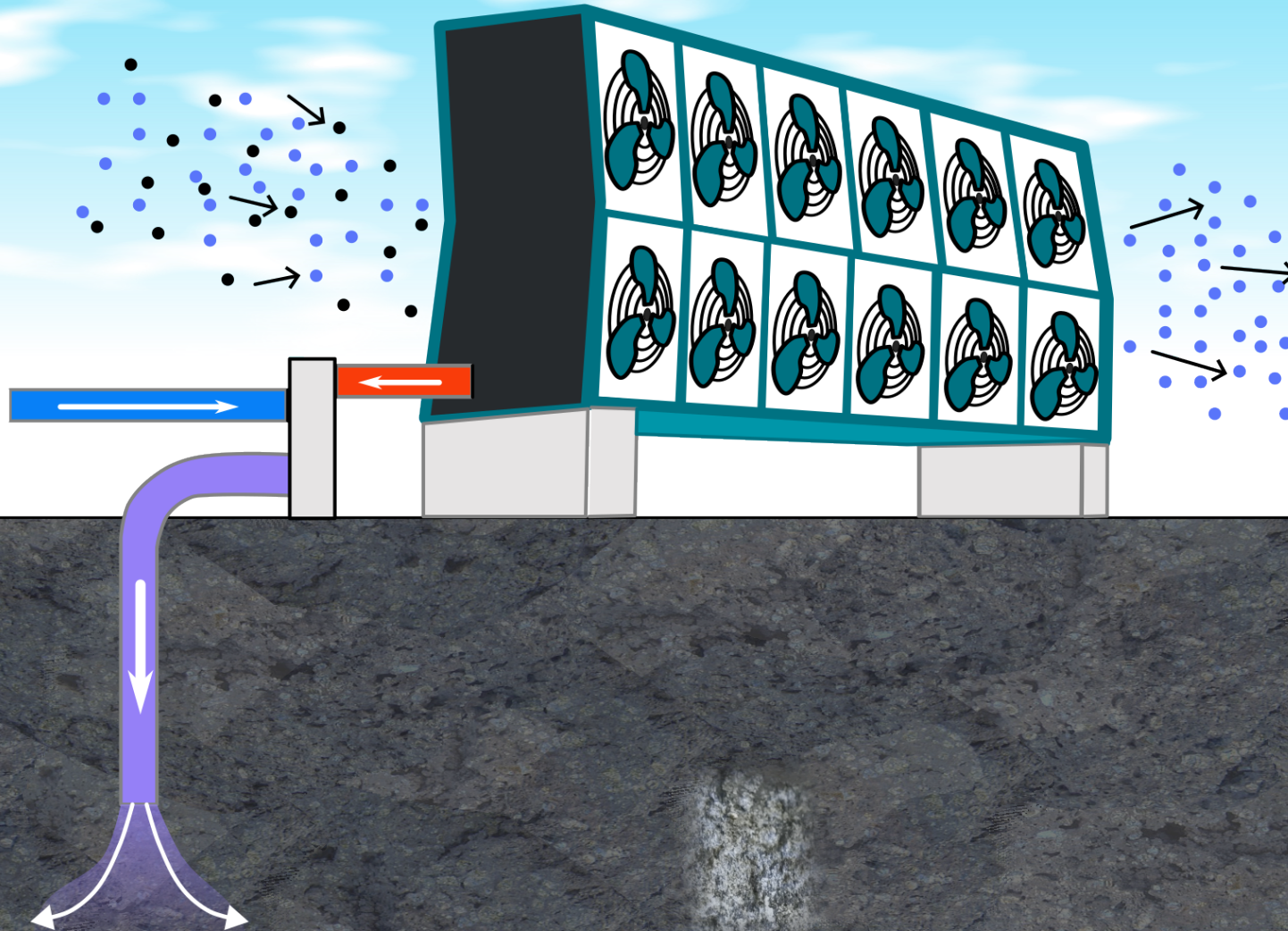


CO₂ aus der Luft binden

PD Dr. habil. Carola Meyer, Institut für Physik, Universität Osnabrück



Kurzes Vorab



Mit Schüler*innen über die Klimakrise reden
Tipps für Lehrkräfte¹



Kurzes Vorab



Mit Schüler*innen über die Klimakrise reden
Tipps für Lehrkräfte¹



Netzwerk Klimabildung Region Osnabrück: info@klimabildung-os.de

Bisher getragen von: Bildung für nachhaltige Entwicklung Osnabrück e. V.

Kurzes Vorab



Mit Schüler*innen über die Klimakrise reden
*Tipps für Lehrkräfte*¹



Netzwerk Klimabildung Region Osnabrück: info@klimabildung-os.de

Bisher getragen von: Bildung für nachhaltige Entwicklung Osnabrück e. V.

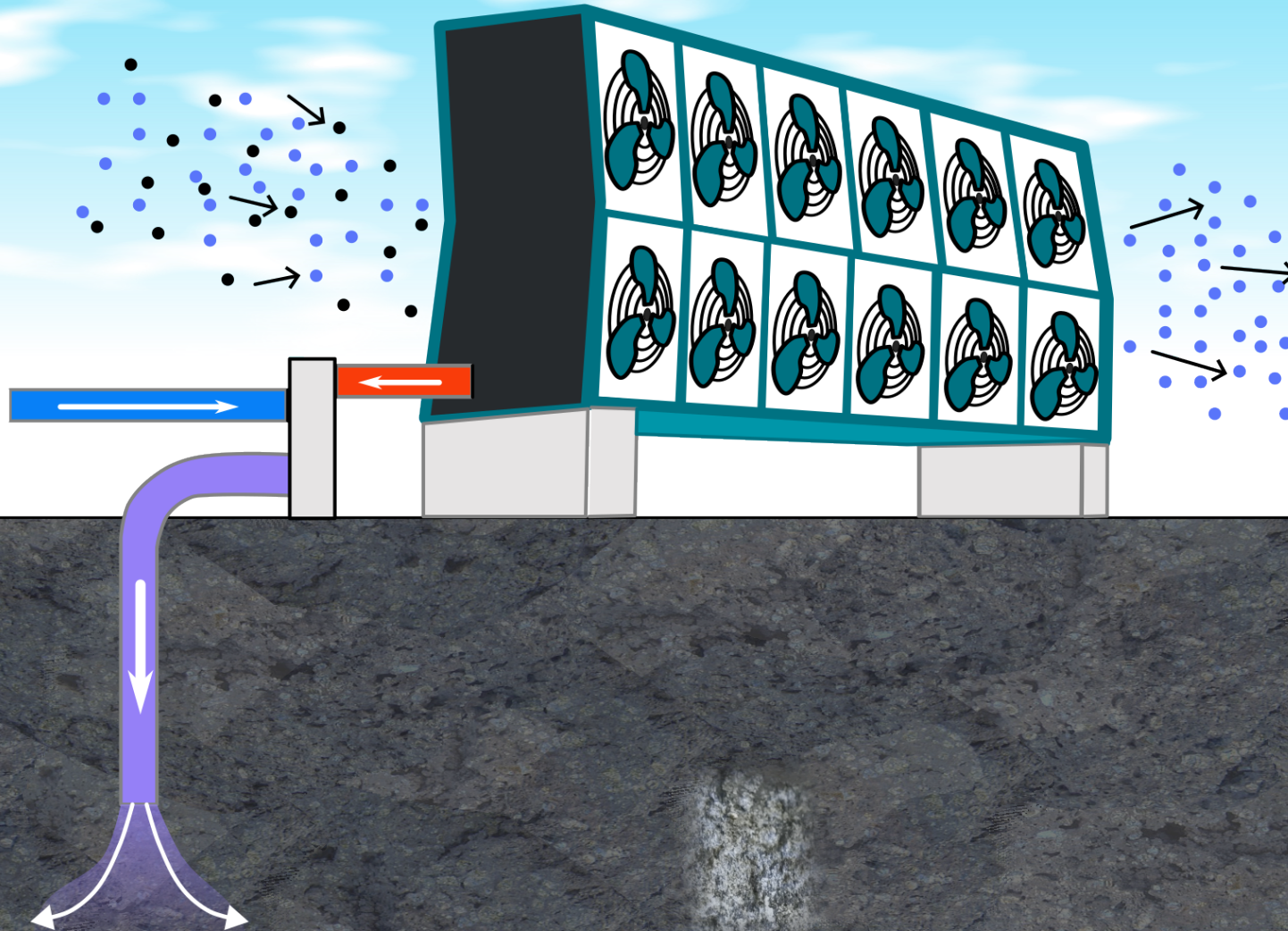


OSIA

BÜRGERINITIATIVE –
OSNABRÜCKER SCHULEN
IM AUFBRUCH

CO₂ aus der Luft binden

PD Dr. habil. Carola Meyer, Institut für Physik, Universität Osnabrück



Übersicht

Einleitung

Warum reden wir darüber und wieviel CO_2 müssen wir der Atmosphäre entnehmen?

Wie wird CO_2 gespeichert?

Allgemeines Prinzip

Umsetzung in der Praxis: Forschungsstandort Ketzin

Kommerzielle Projekte

Wie wird CO_2 technisch aus der Luft gefiltert?

Was ist die Herausforderung?

Bisherige Lösungsansätze

Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

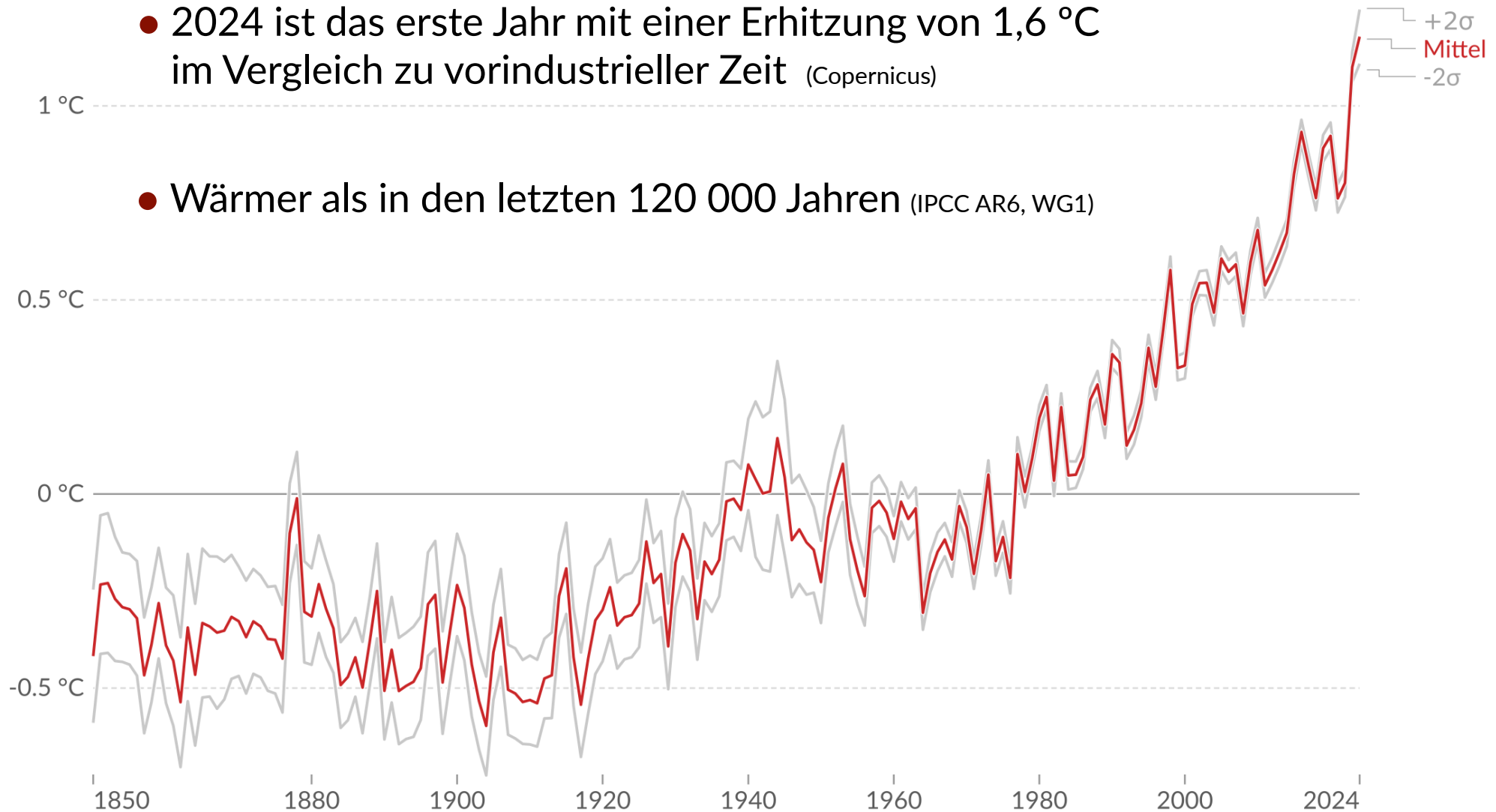
Global gemittelte Temperaturabweichung

Our World
in Data

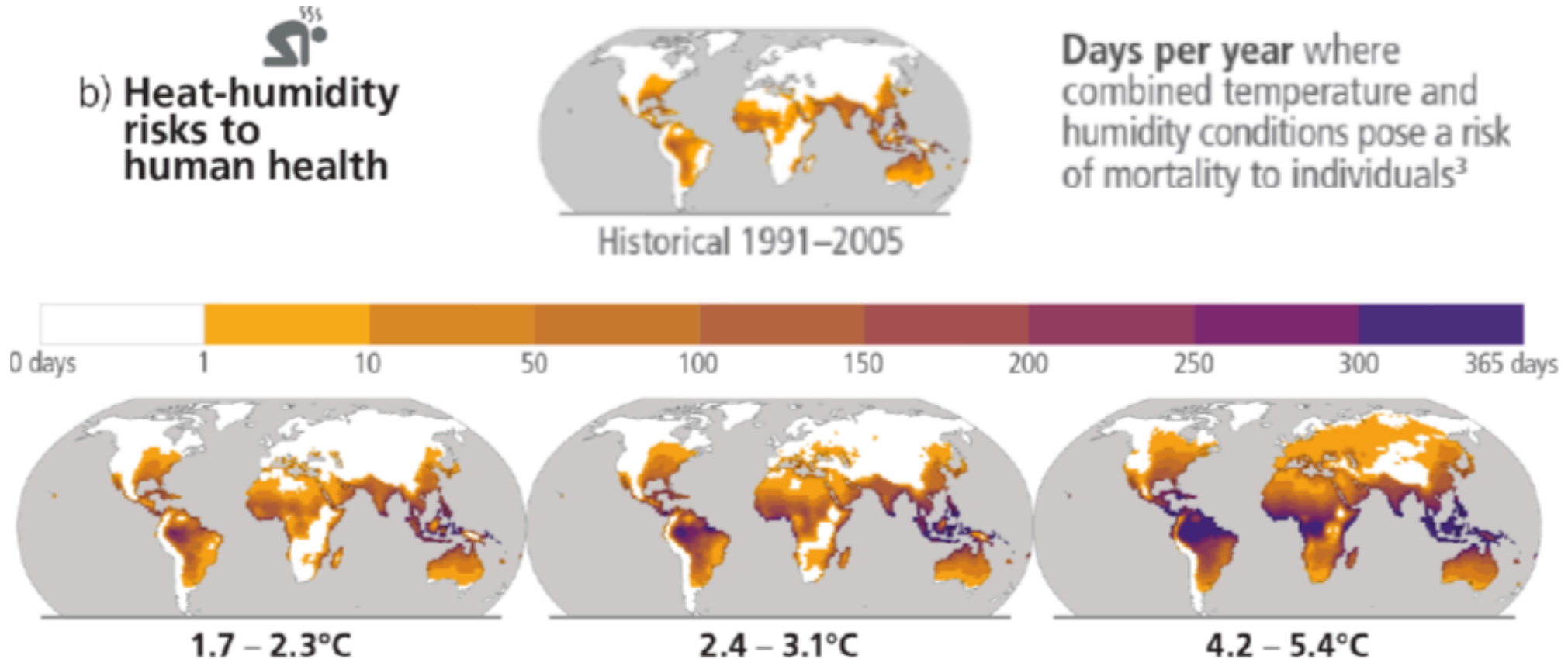
Globale durchschnittliche Land-Meer Temperaturanomalie relativ zum Temperaturmittel von 1961-1990.

- 2024 ist das erste Jahr mit einer Erhitzung von 1,6 °C im Vergleich zu vorindustrieller Zeit (Copernicus)

- Wärmer als in den letzten 120 000 Jahren (IPCC AR6, WG1)



Auswirkungen Erderhitzung



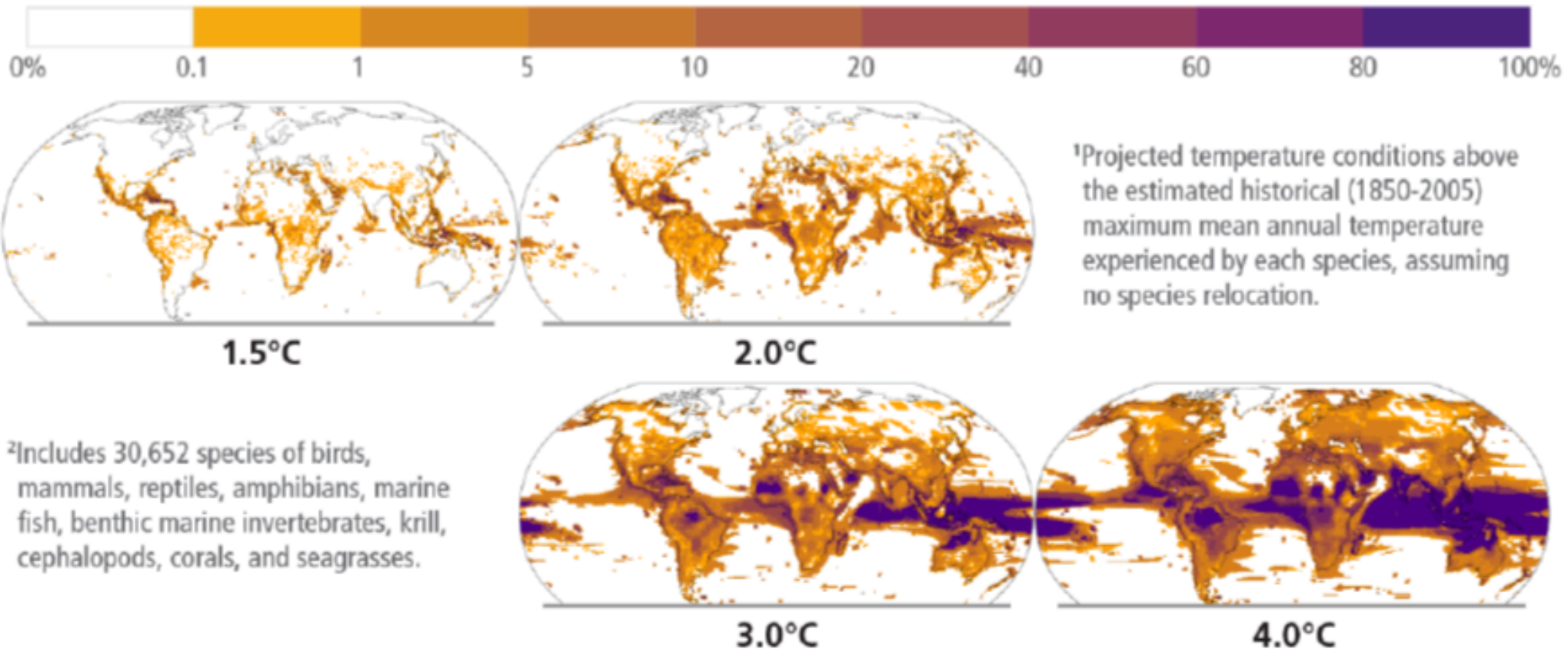
³Projected regional impacts utilize a global threshold beyond which daily mean surface air temperature and relative humidity may induce hyperthermia that poses a risk of mortality. The duration and intensity of heatwaves are not presented here. Heat-related health outcomes vary by location and are highly moderated by socio-economic, occupational and other non-climatic determinants of individual health and socio-economic vulnerability. The threshold used in these maps is based on a single study that synthesized data from 783 cases to determine the relationship between heat-humidity conditions and mortality drawn largely from observations in temperate climates.

Auswirkungen Erderhitzung

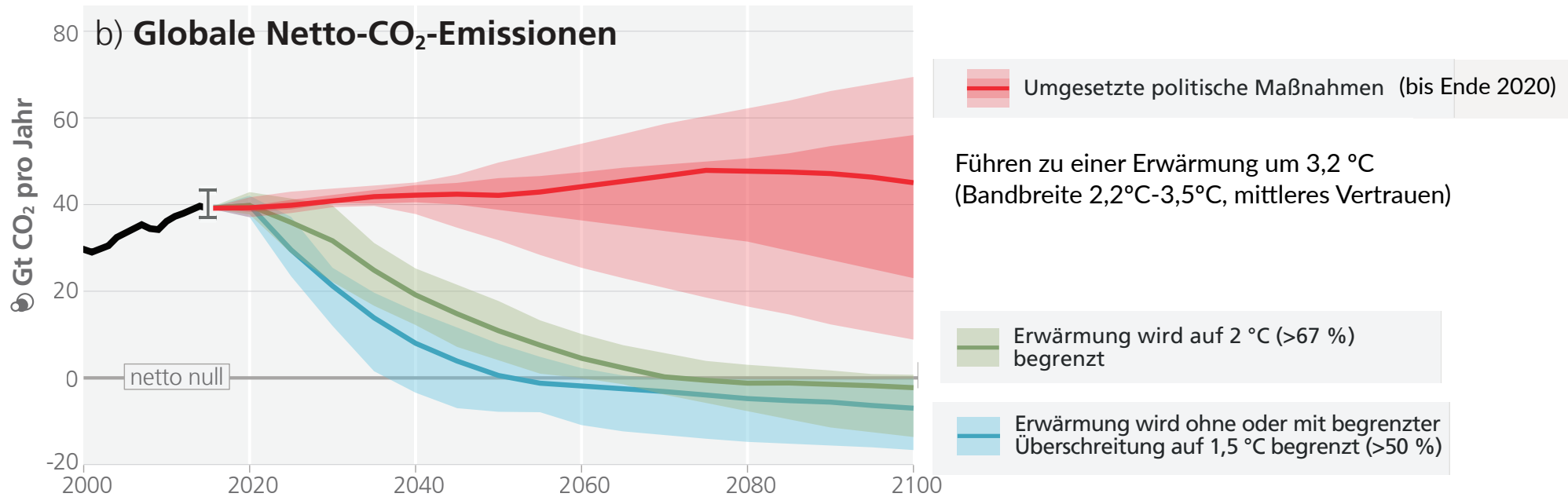
a) Risk of species losses



Percentage of animal species and seagrasses exposed to potentially dangerous temperature conditions^{1, 2}



CO₂ Reduktionspfade

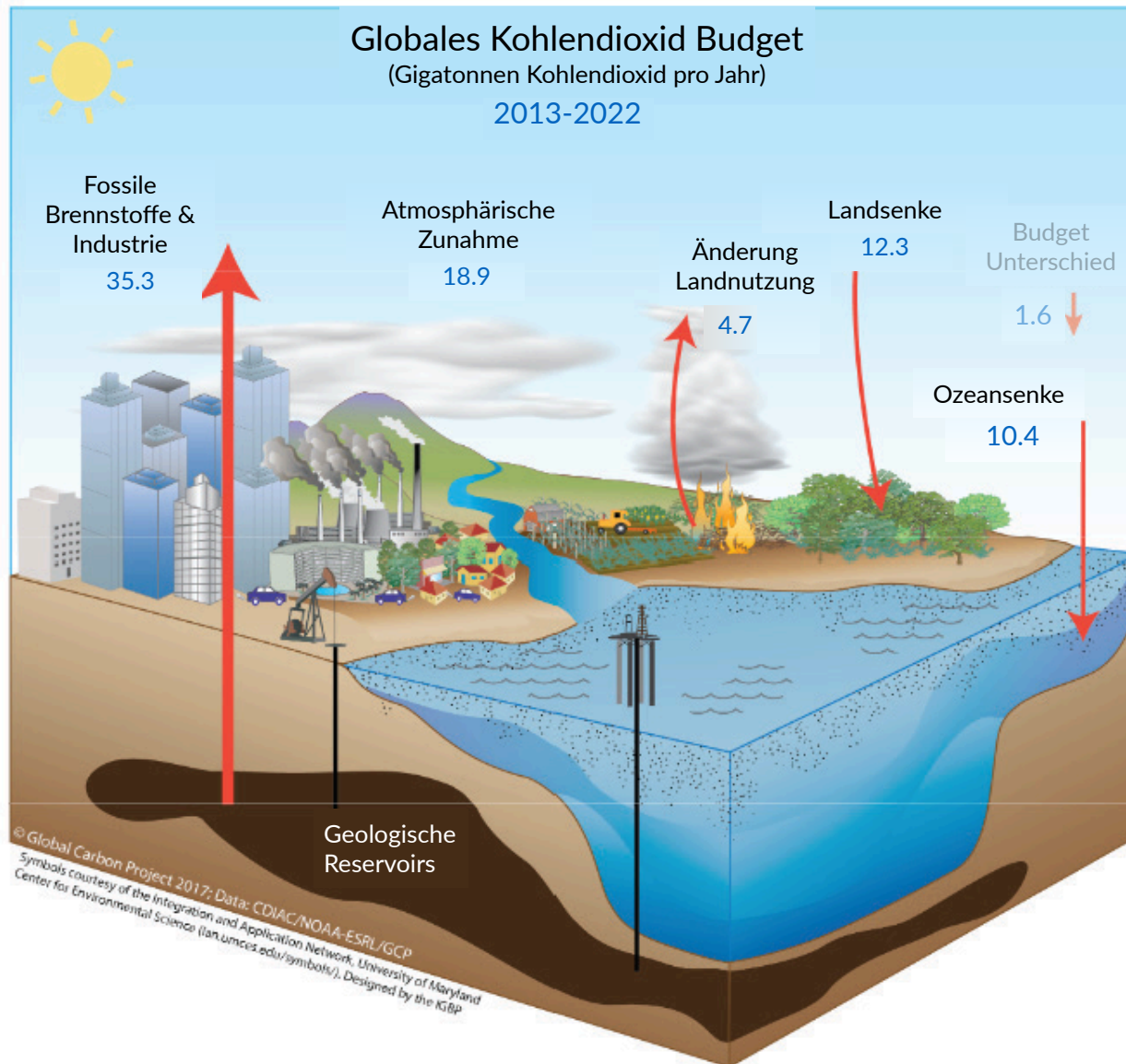


Fast alle Pfade, die das international vertraglich vereinbarte Ziel von der COP Paris einhalten, beinhalten „negative Emissionen“

Es muss im Verlauf der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden

Aber: verwendete Integrated assessment models (IAMs) sind in der Kritik wg hoher Negativ-Emissionen, bis zu 2000 GtCO₂ (akkumuliert bis 2100)

Das globale CO₂ Budget

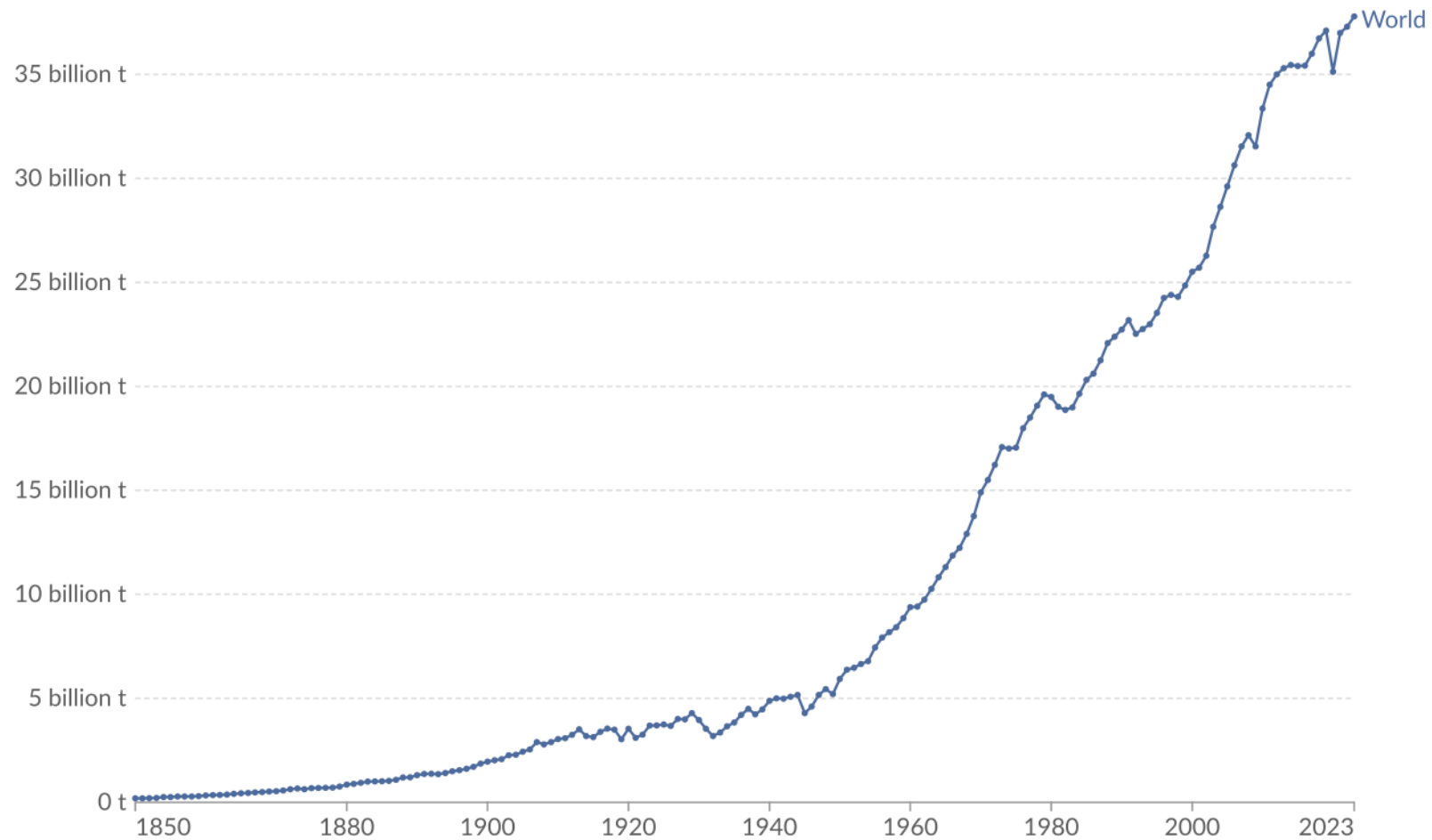


~45% der Emissionen verbleiben
in der Atmosphäre

~55% der Emissionen werden von
natürlichen Senken aufgenommen

Die natürlichen Senken sind in
den Reduktionspfaden bereits
eingepreist.

CO₂ Emissionen weltweit

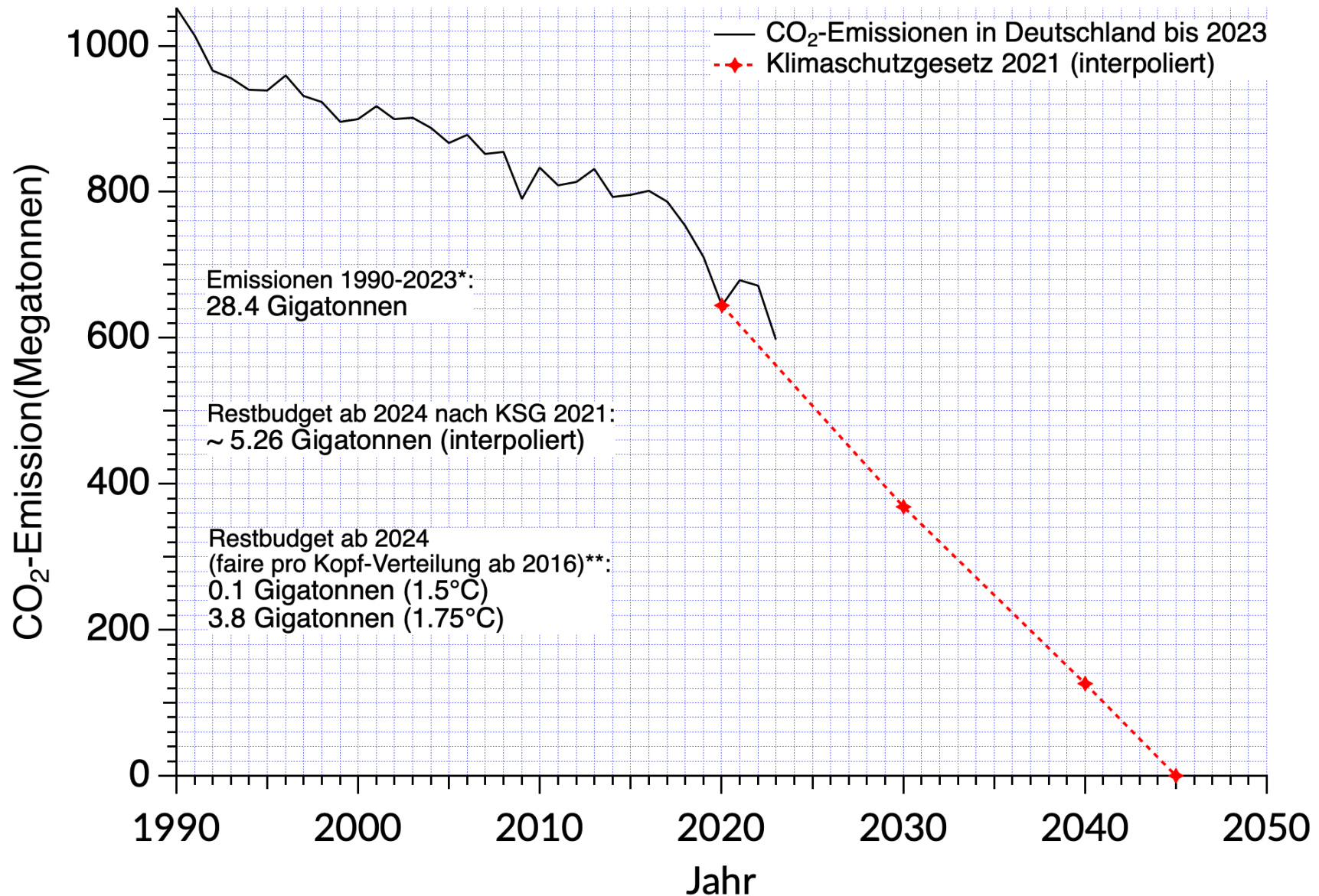
Our World
in Data

Data source: Global Carbon Budget (2024)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

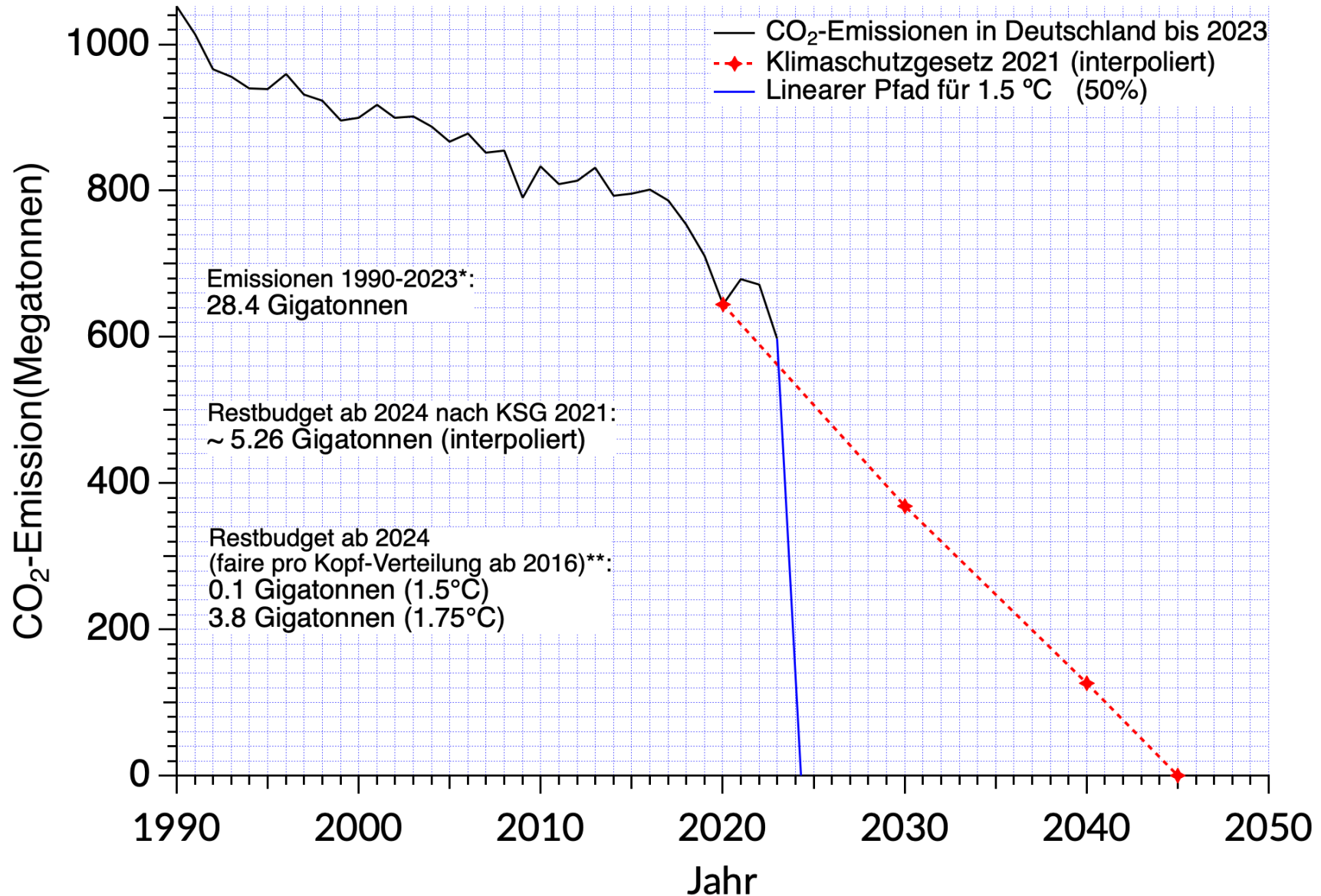
1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

CO₂ Emissionen Deutschland



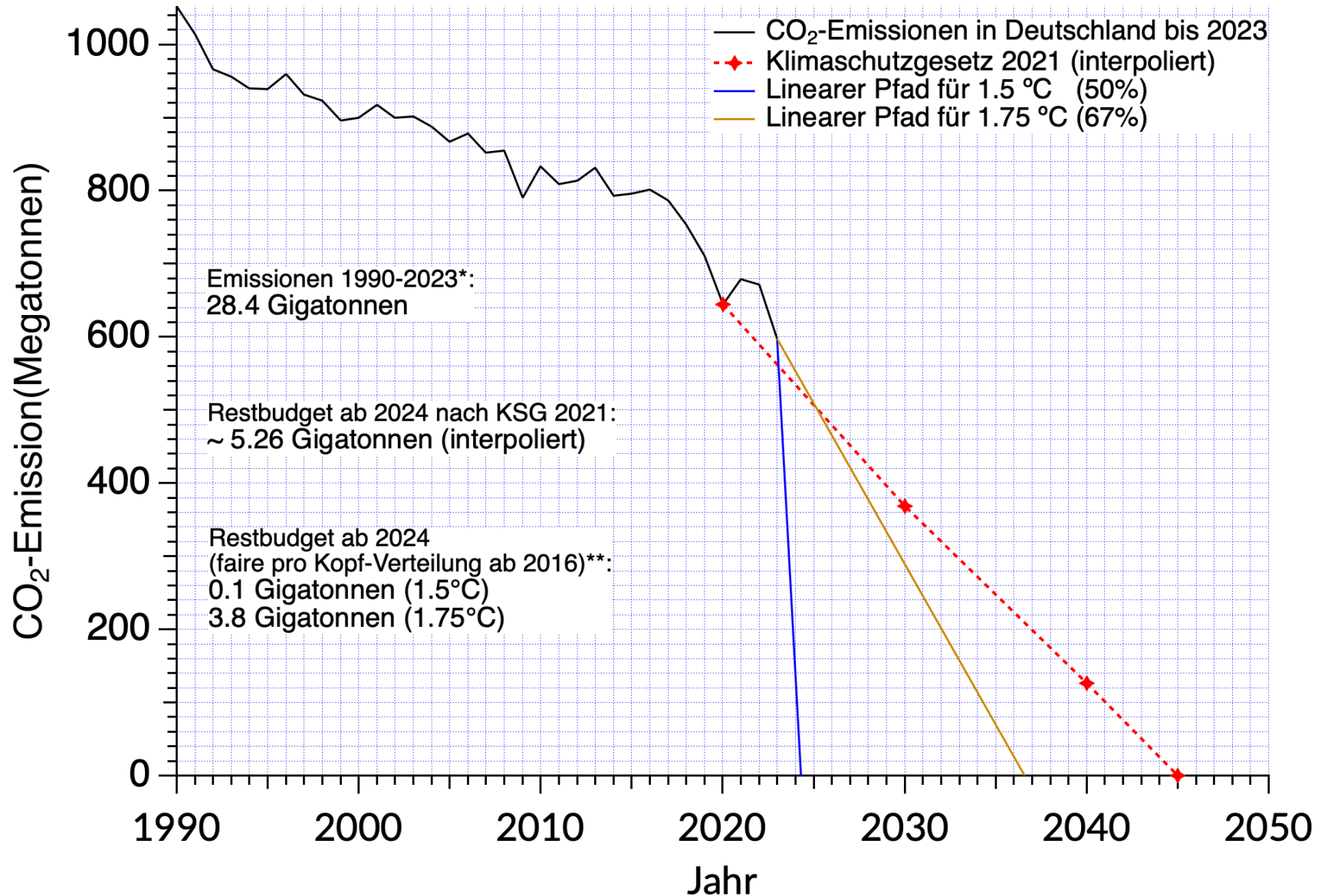
*Daten zu CO₂ Emissionen: UBA **Budget für Deutschland nach SRU "Wo stehen wir beim CO₂-Budget? Eine Aktualisierung" (2024)
Grafik: Carola Meyer CC BY 4.0

CO₂ Emissionen Deutschland



*Daten zu CO₂ Emissionen: UBA **Budget für Deutschland nach SRU "Wo stehen wir beim CO₂-Budget? Eine Aktualisierung" (2024)
Grafik: Carola Meyer CC BY 4.0

CO₂ Emissionen Deutschland



*Daten zu CO₂ Emissionen: UBA **Budget für Deutschland nach SRU "Wo stehen wir beim CO₂-Budget? Eine Aktualisierung" (2024)
Grafik: Carola Meyer CC BY 4.0

Wieviel CCS braucht Deutschland?

~ 60 Mt/a

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021)

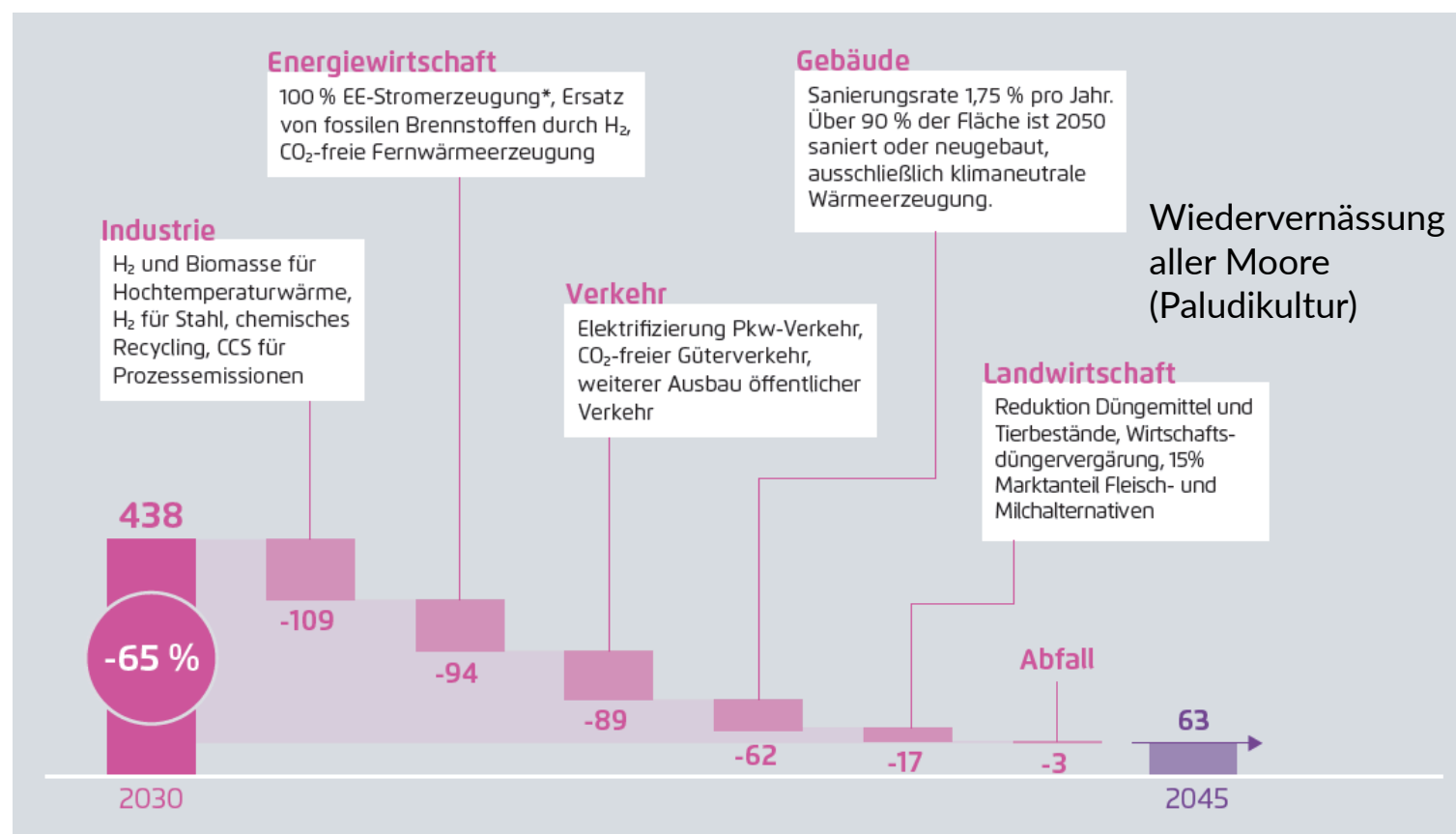
Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann
Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende

Bis 2030

Kohleausstieg

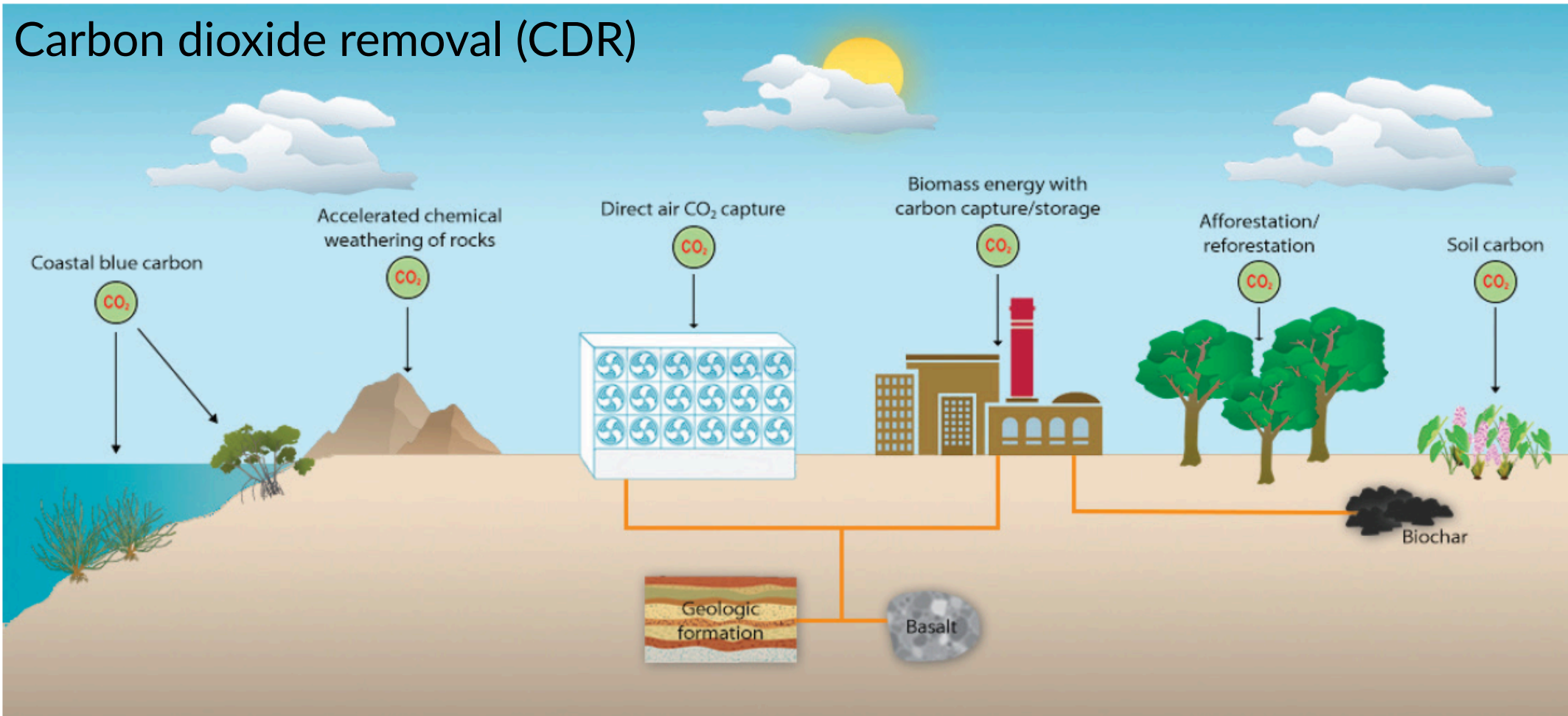
14 Mio PKW
+
30% LKW
elektrisch

6 Mio.
Wärme-
pumpen



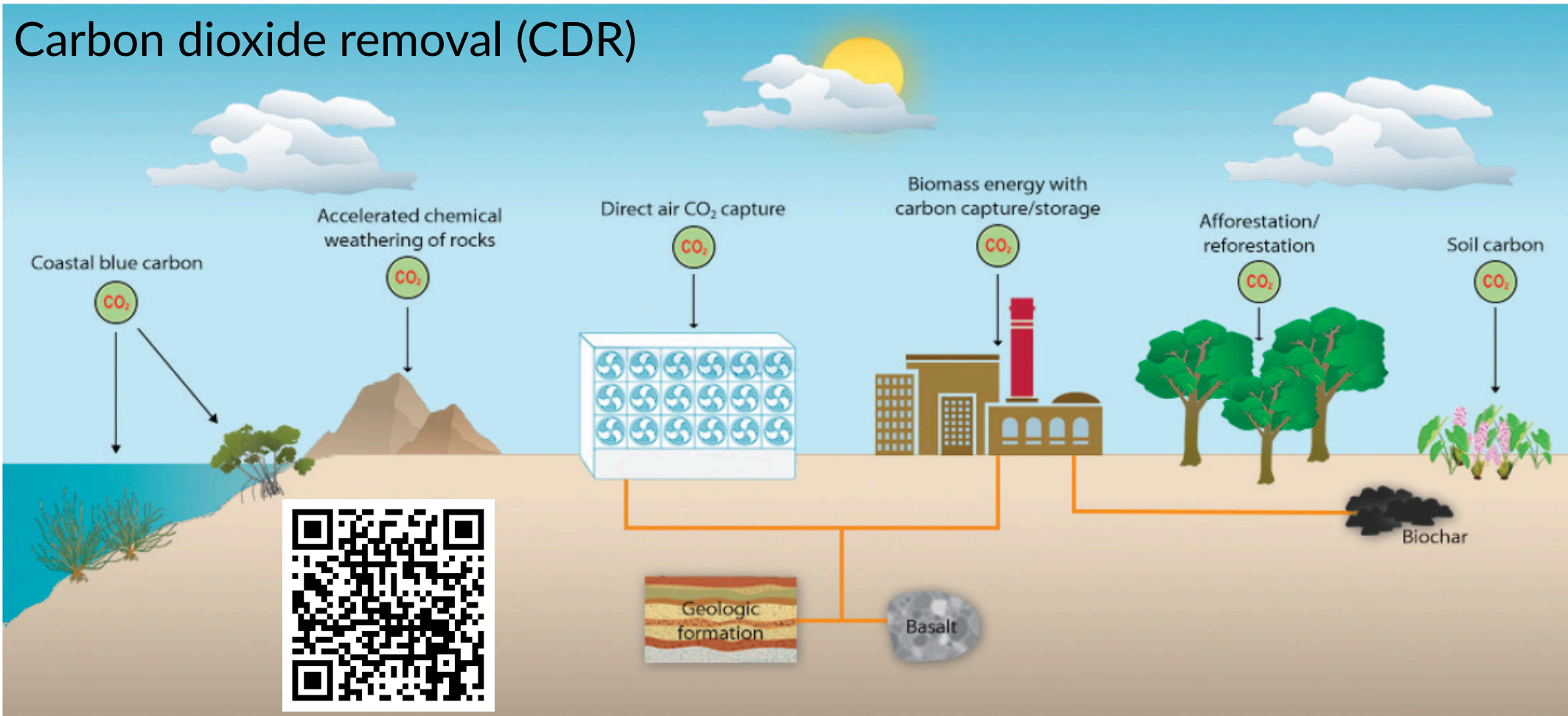
Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre

Carbon dioxide removal (CDR)



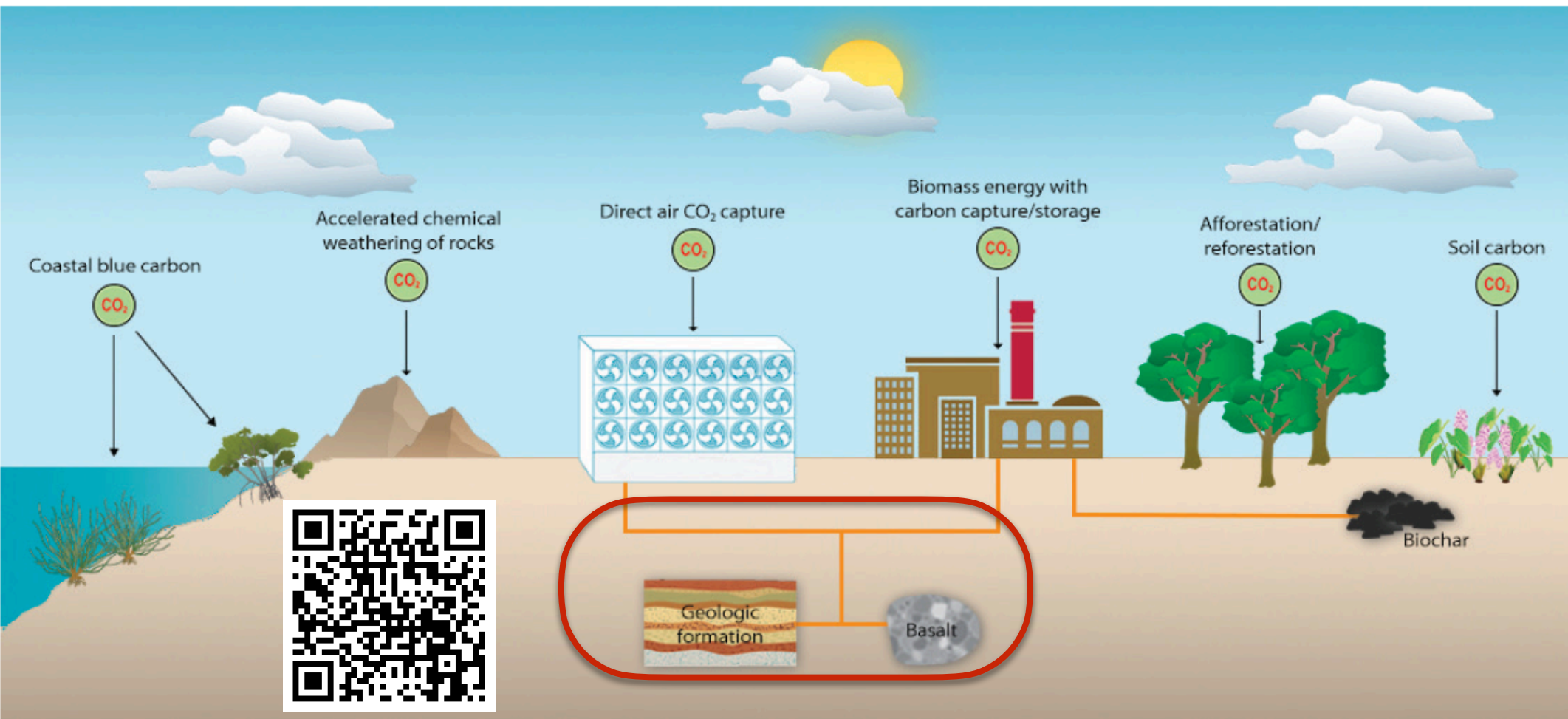
Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre

Carbon dioxide removal (CDR)



Als Einführung: S4F Spotlight auf YouTube von Prof. Dr. Andreas Oschlies (GEOMAR)

Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre



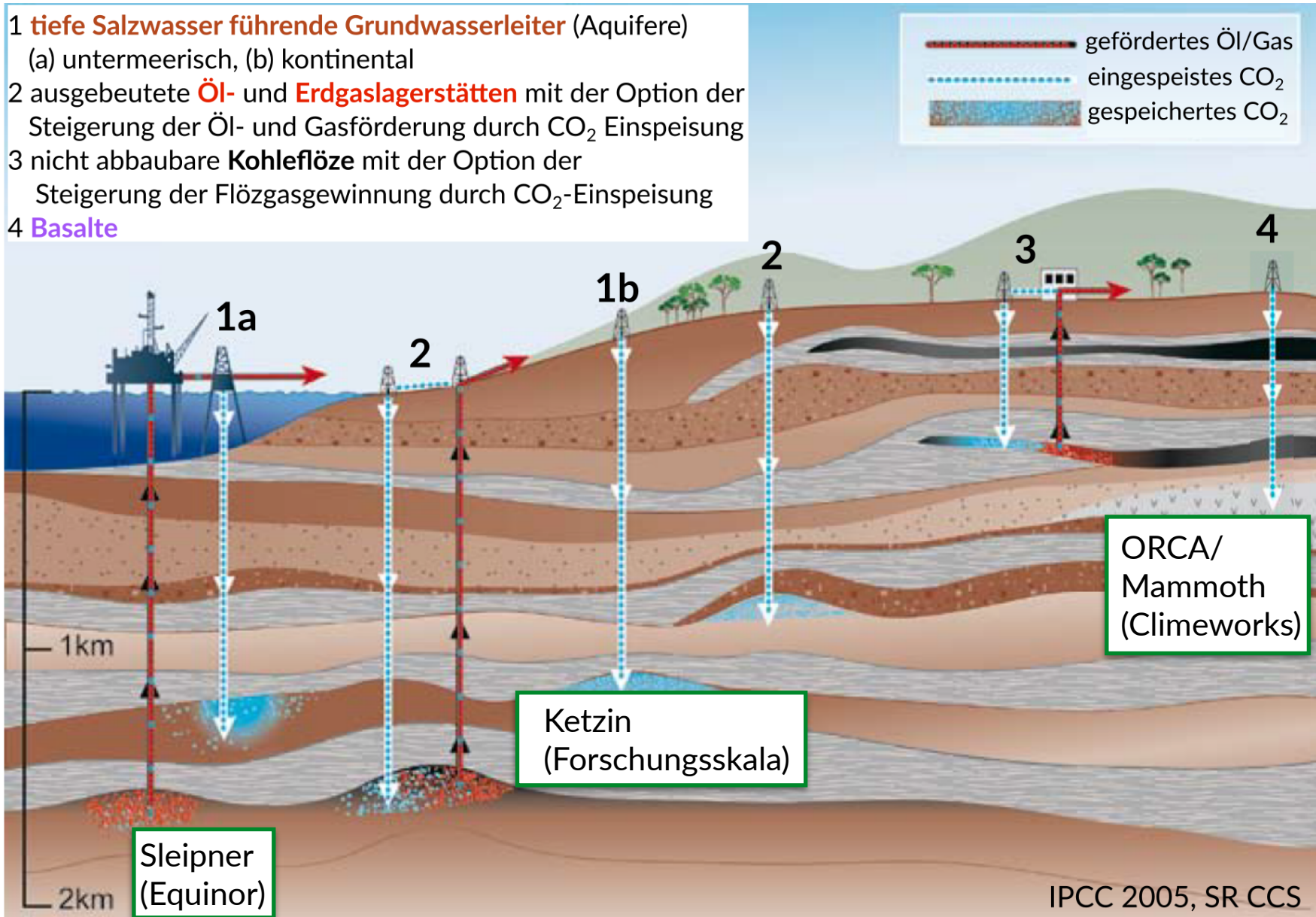
DACCS: Entnahme aus der Luft

BECCS: Bioenergie

mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (+ Nutzung)

Möglichkeiten geologischer CO₂-Speicherung

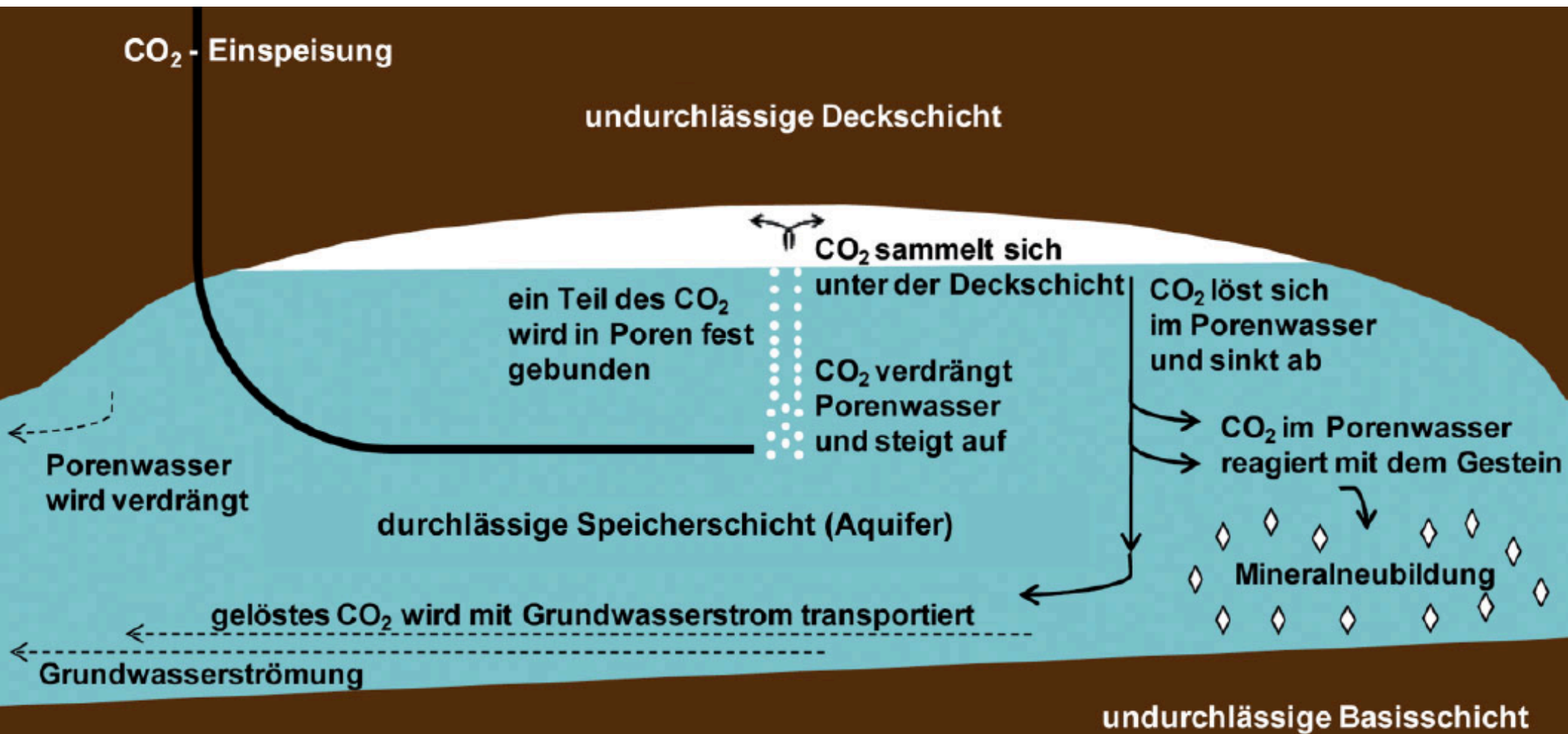
- 1 **tiefe Salzwasser führende Grundwasserleiter** (Aquifere)
(a) untermeerisch, (b) kontinental
- 2 ausgebeutete **Öl-** und **Erdgaslagerstätten** mit der Option der Steigerung der Öl- und Gasförderung durch CO₂ Einspeisung
- 3 nicht abbaubare **Kohleflöze** mit der Option der Steigerung der Flözgasgewinnung durch CO₂-Einspeisung
- 4 **Basalte**



Prinzip der CO₂ Speicherung

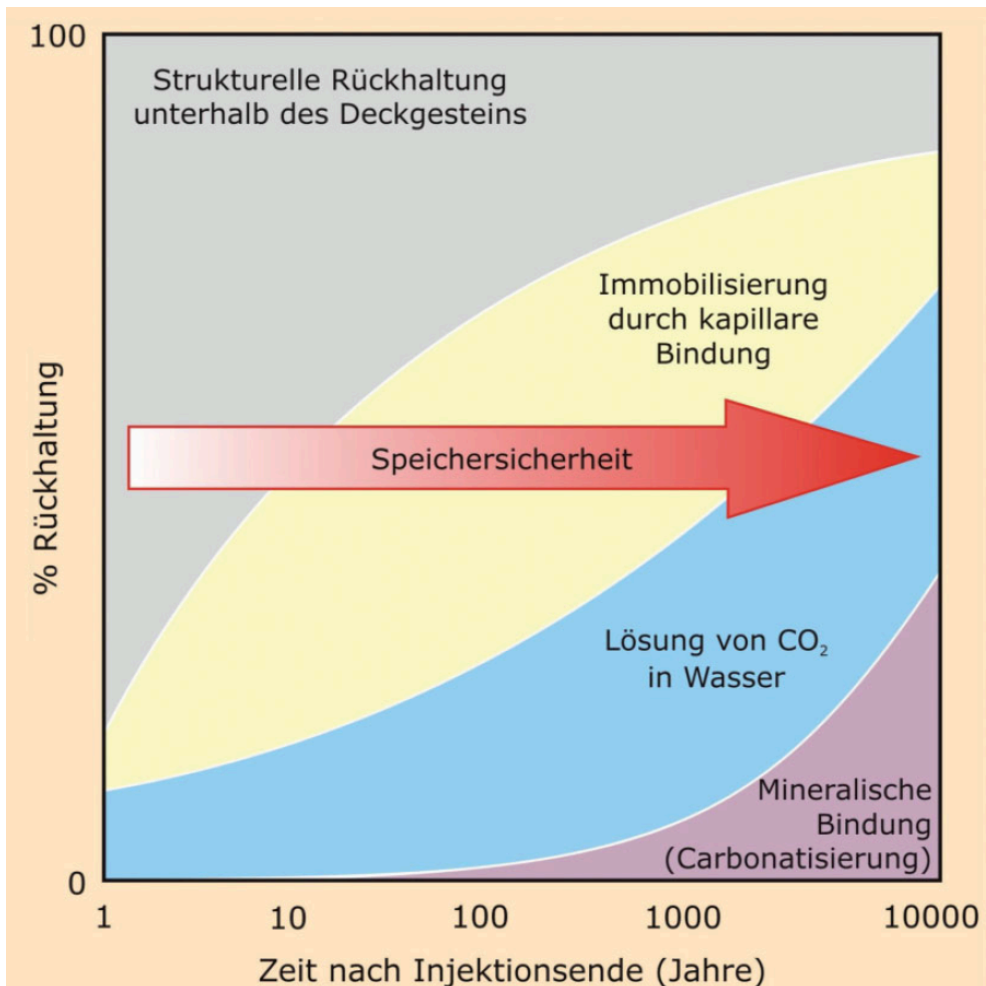
Speicherung in porösen Gesteinslagen (Basalt oder Sandstein)

CO₂ löst sich im Wasser => Kohlensäure => Reaktion mit Gestein zu Carbonaten

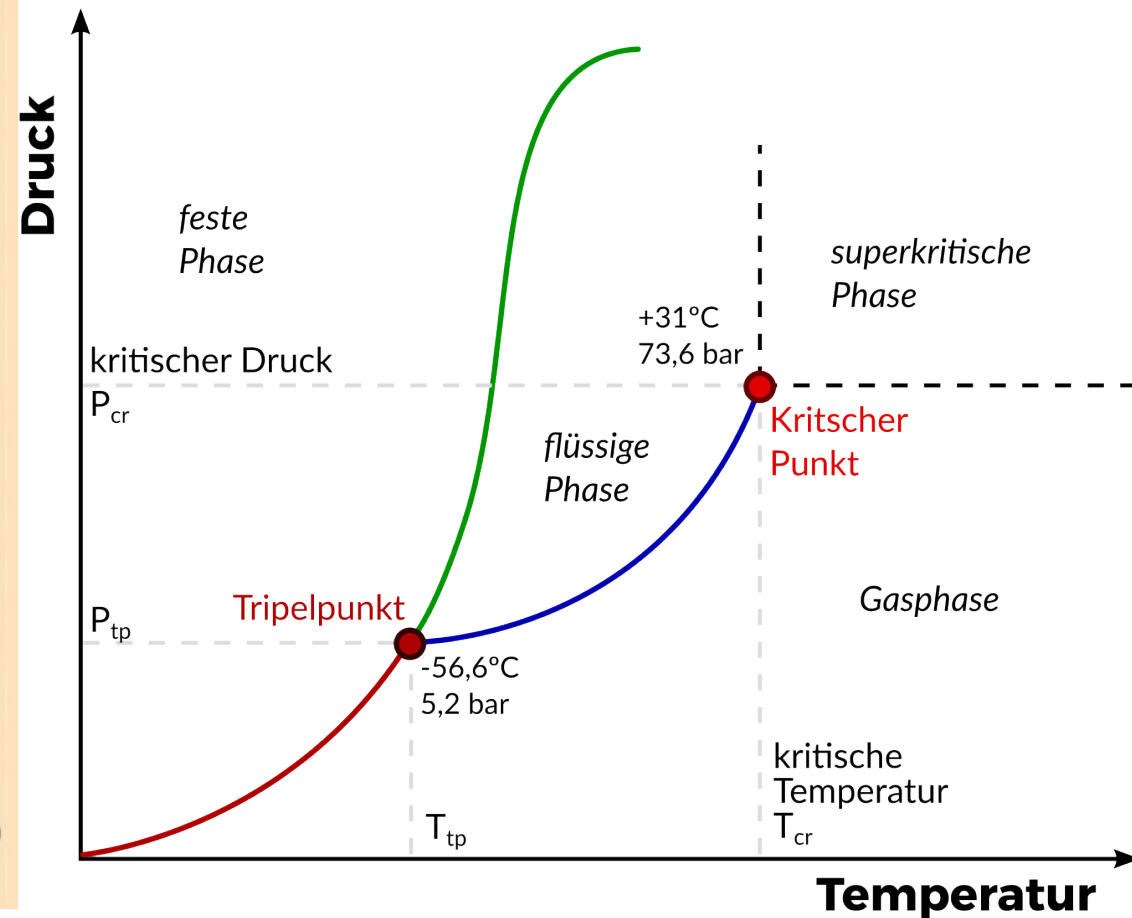


Was passiert mit dem CO₂?

Erwartete zeitliche Entwicklung



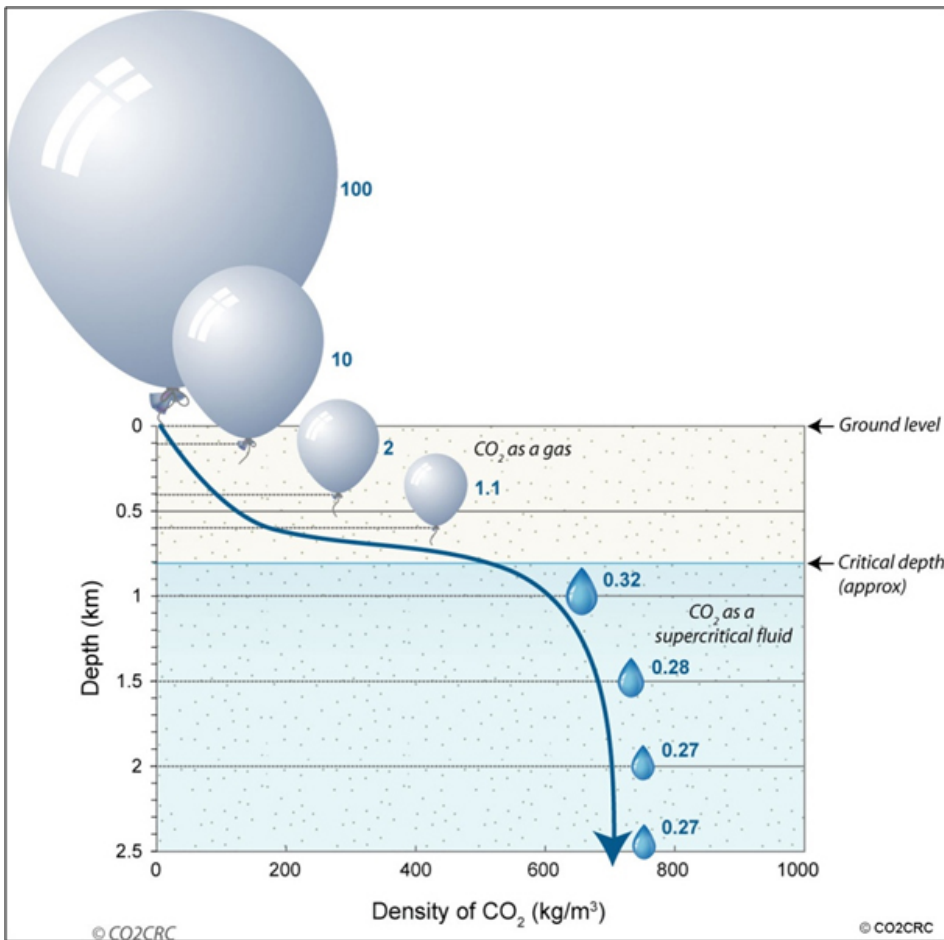
Eingespeistes CO₂ in superkritischer Phase
„Flüssigkeit ohne Viskosität“: kommt in kleinste Poren



Was passiert mit dem CO₂?

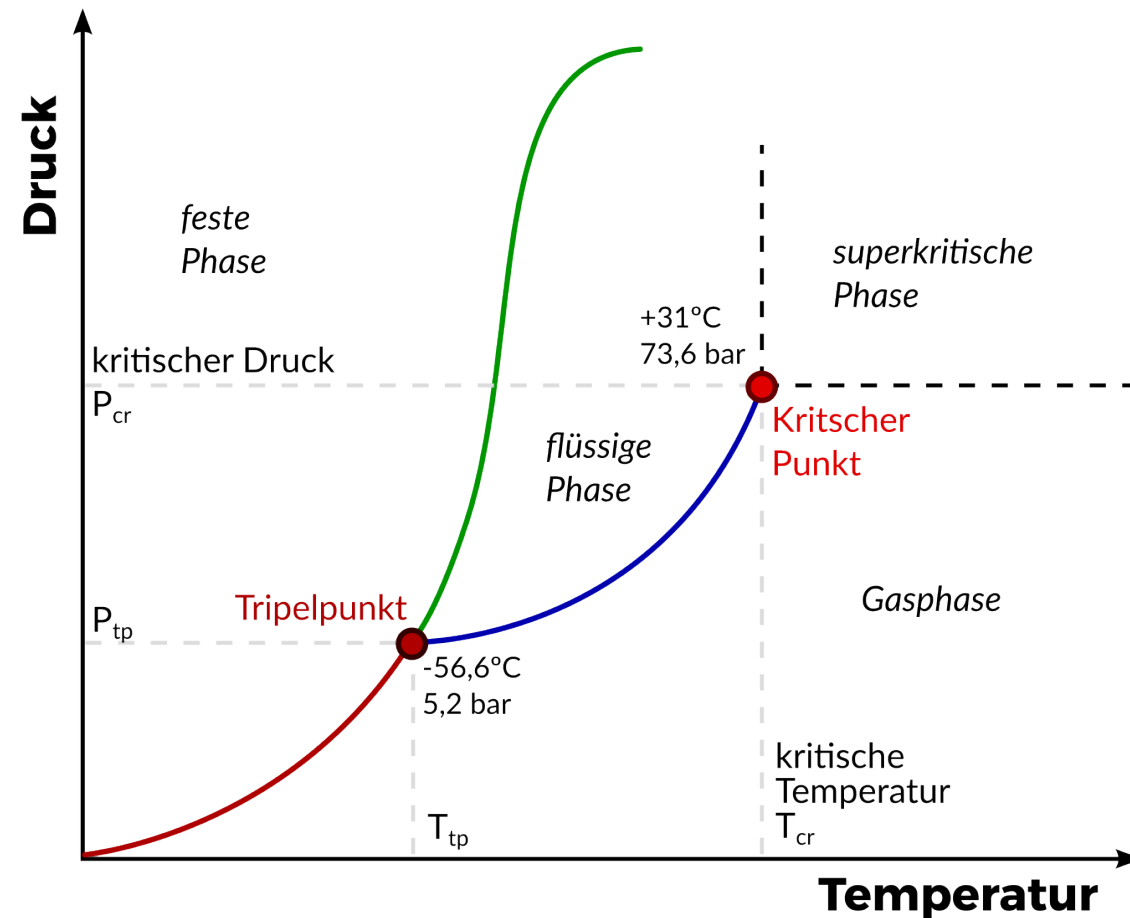
CO₂ in superkritischer Phase

Braucht viel weniger Platz als in Gasphase

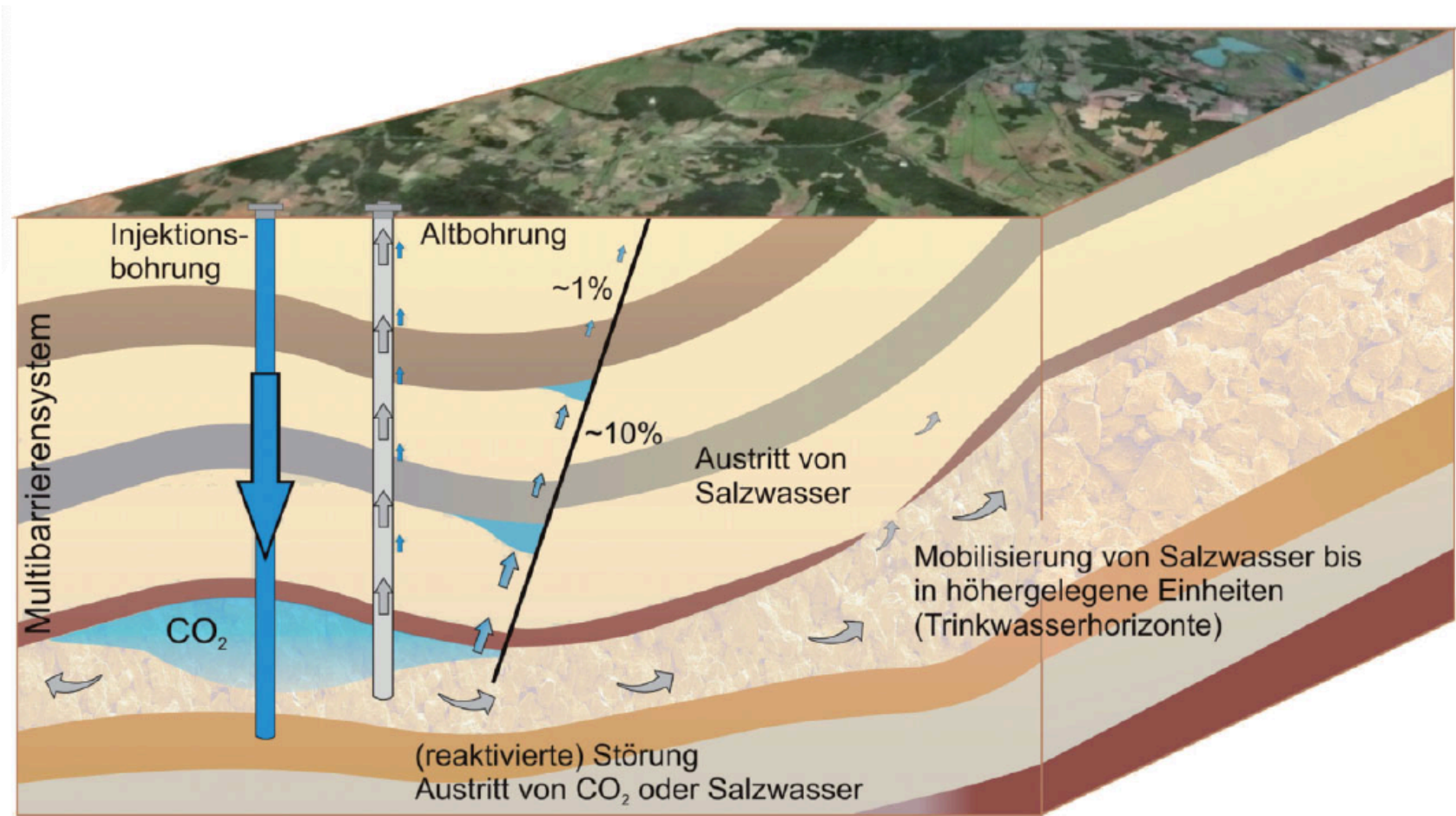


Eingespeist in superkritischer Phase

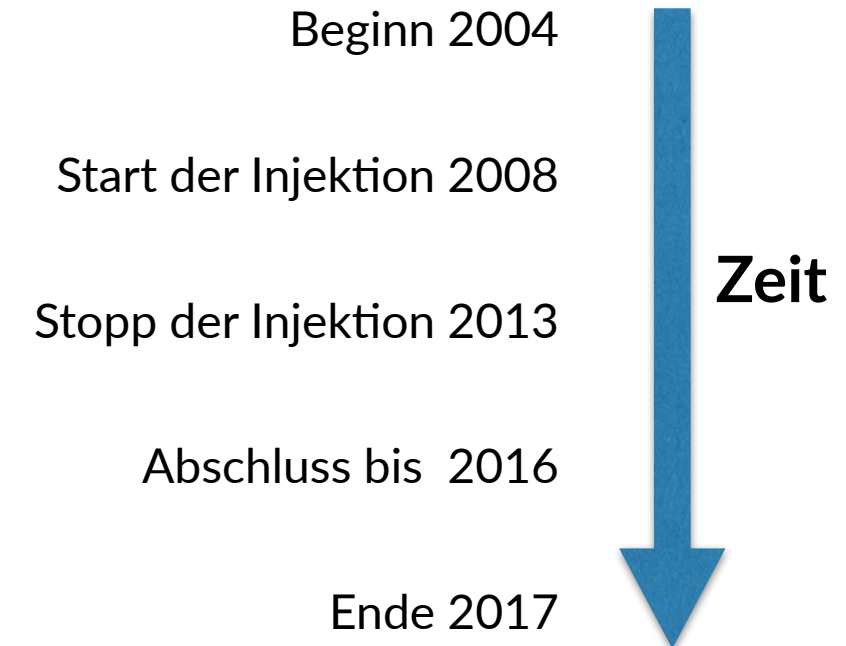
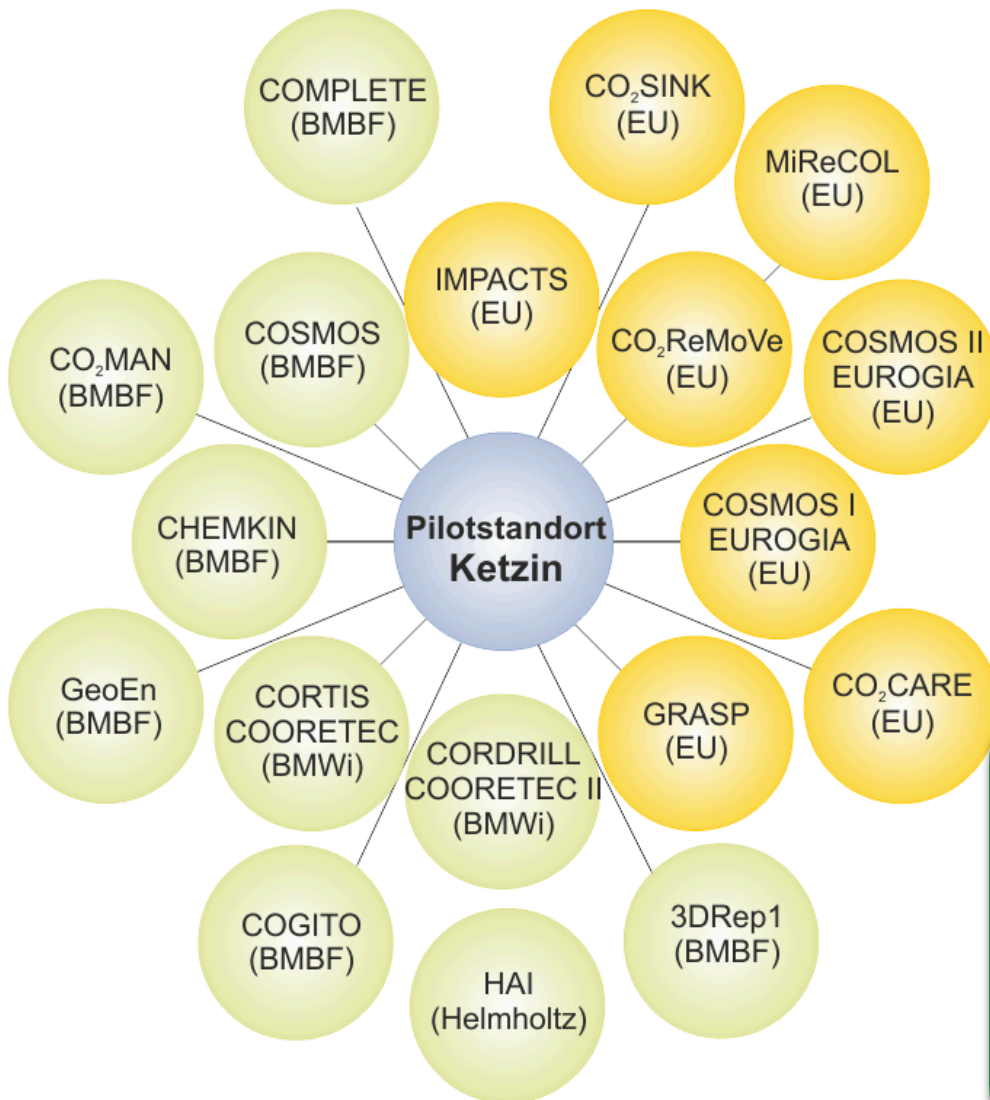
„Flüssigkeit ohne Viskosität“: kommt in kleinste Poren



Was kann passieren?



Forschungsstandort Ketzin

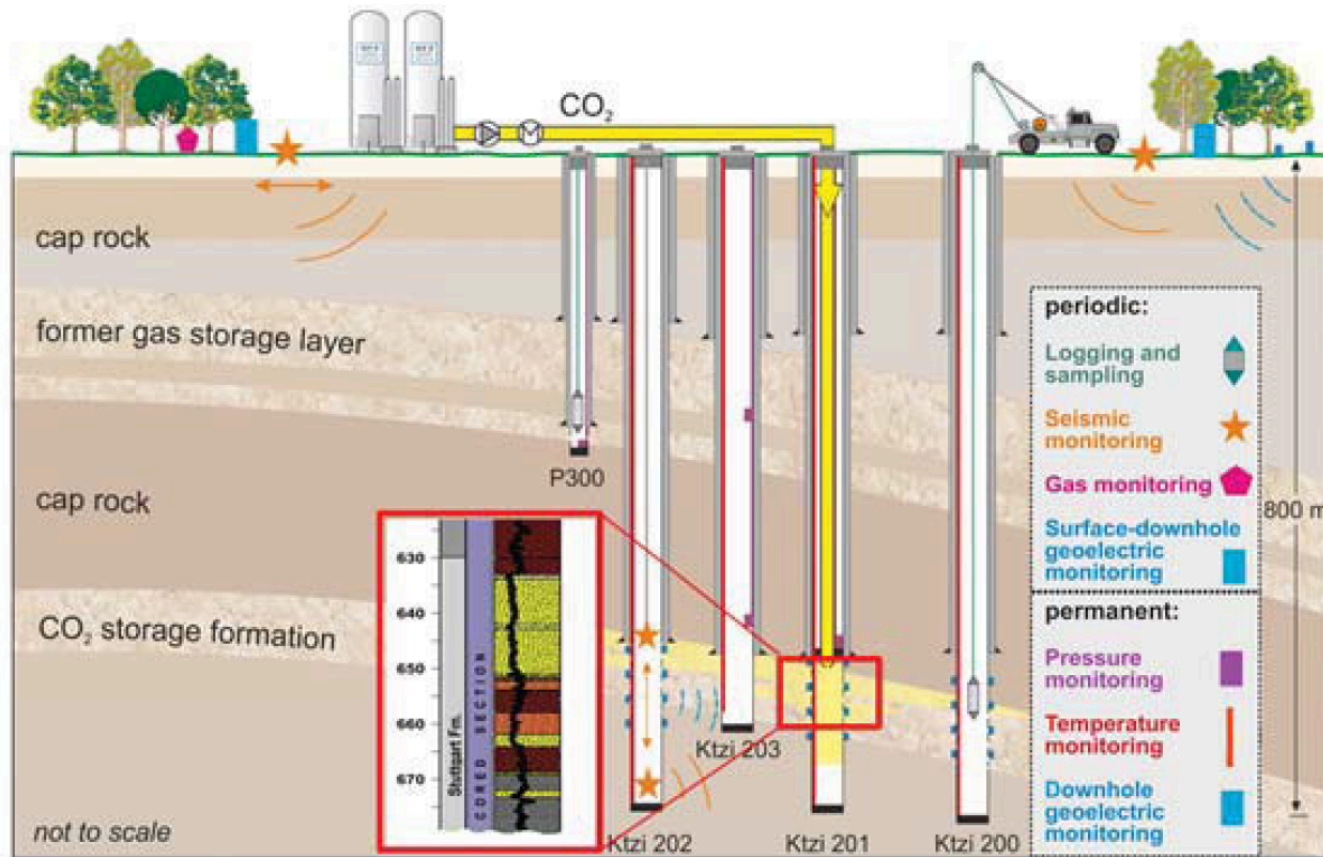


Gesamte Menge CO₂: 67.000 t

Tiefe des CO₂ - Reservoirs: 625 m - 650 m

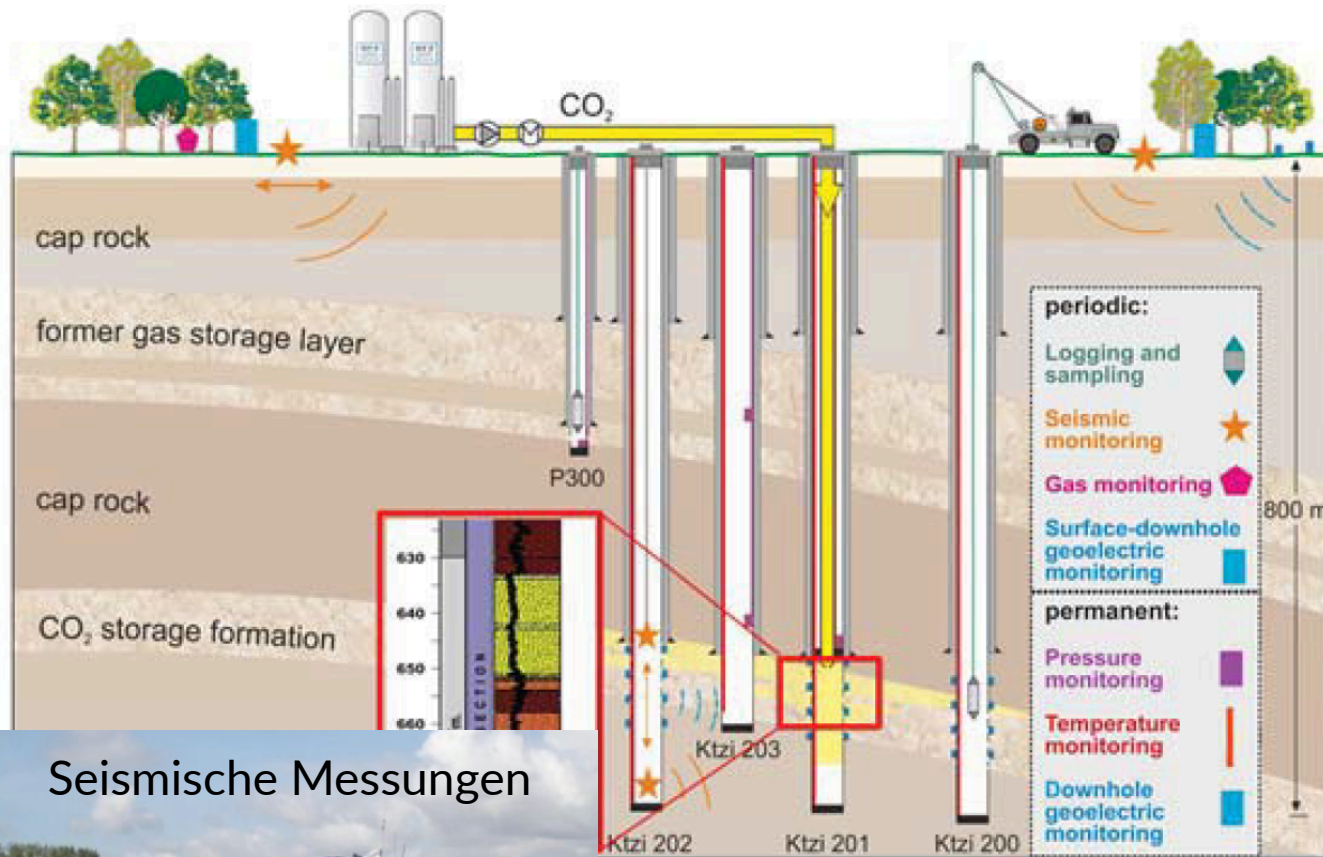
Reservoir: Saliner Aquifer, Sandsteinschicht,
Porosität ~26%, Permeabilität ~ 100 mD

Monitoring



- Feststellung CO₂-Ankunft an den Beobachtungsbohrungen
- Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der CO₂-Verteilung
- Sicherheitsmonitoring zur Gewährleistung der Dichtigkeit

Monitoring

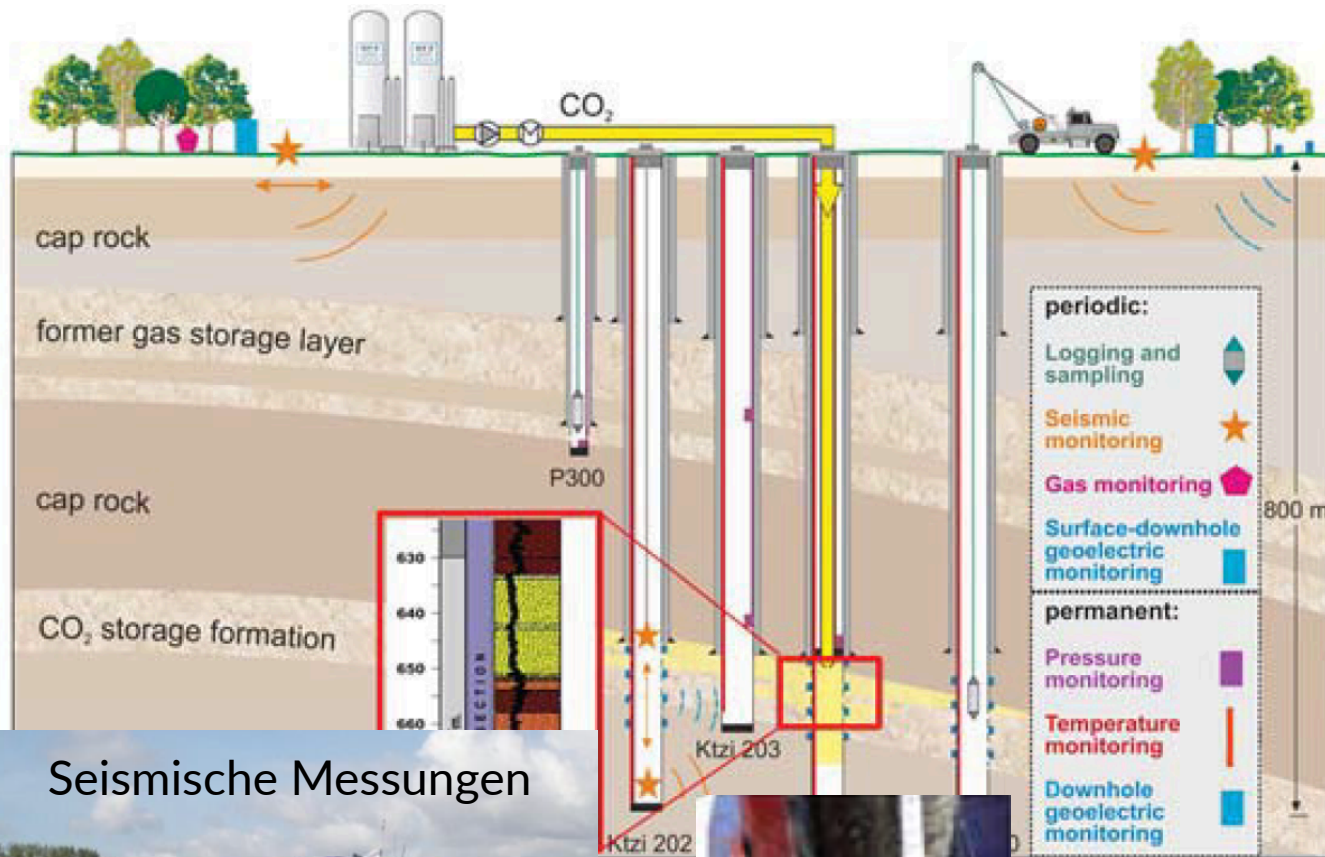


Seismische Messungen



- Feststellung CO₂-Ankunft an den Beobachtungsbohrungen
- Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der CO₂-Verteilung
- Sicherheitsmonitoring zur Gewährleistung der Dichtigkeit

Monitoring



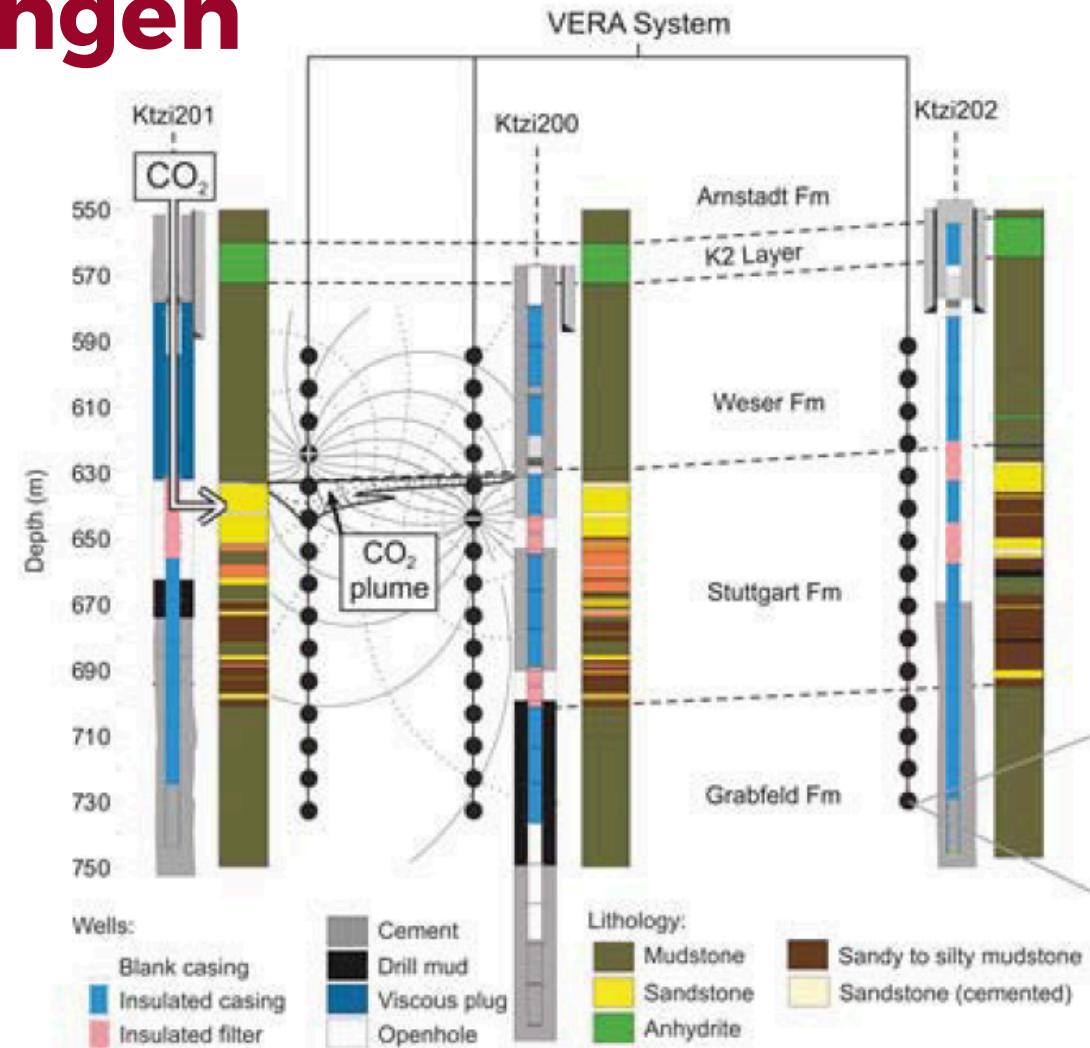
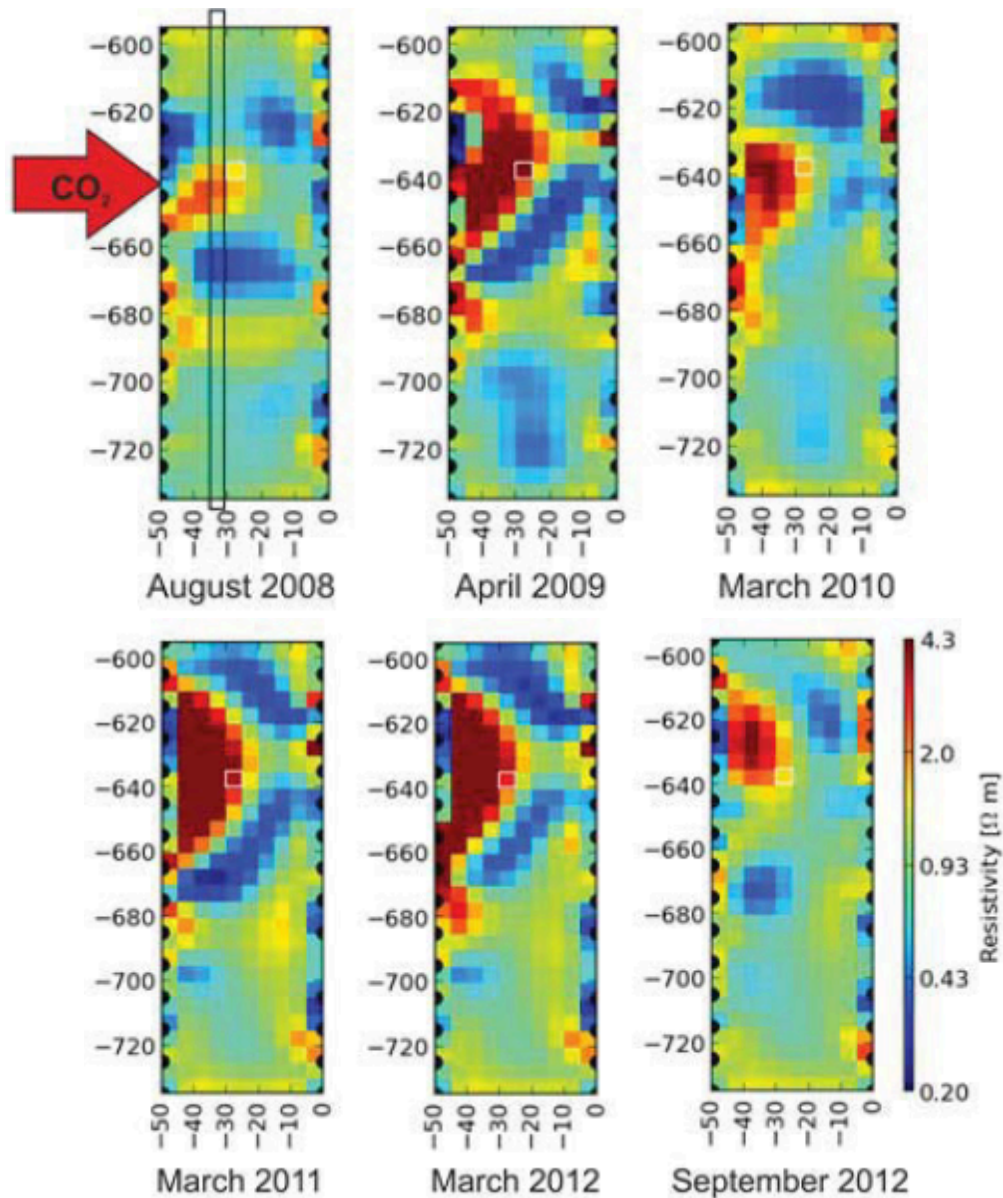
Seismische Messungen



Messung des elektrischen Widerstandes an Gestein

- Feststellung CO₂-Ankunft an den Beobachtungsbohrungen
- Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der CO₂-Verteilung
- Sicherheitsmonitoring zur Gewährleistung der Dichtigkeit

Widerstandsmessungen



Entwicklung der CO₂ Verteilung lässt sich während der Injektion verfolgen

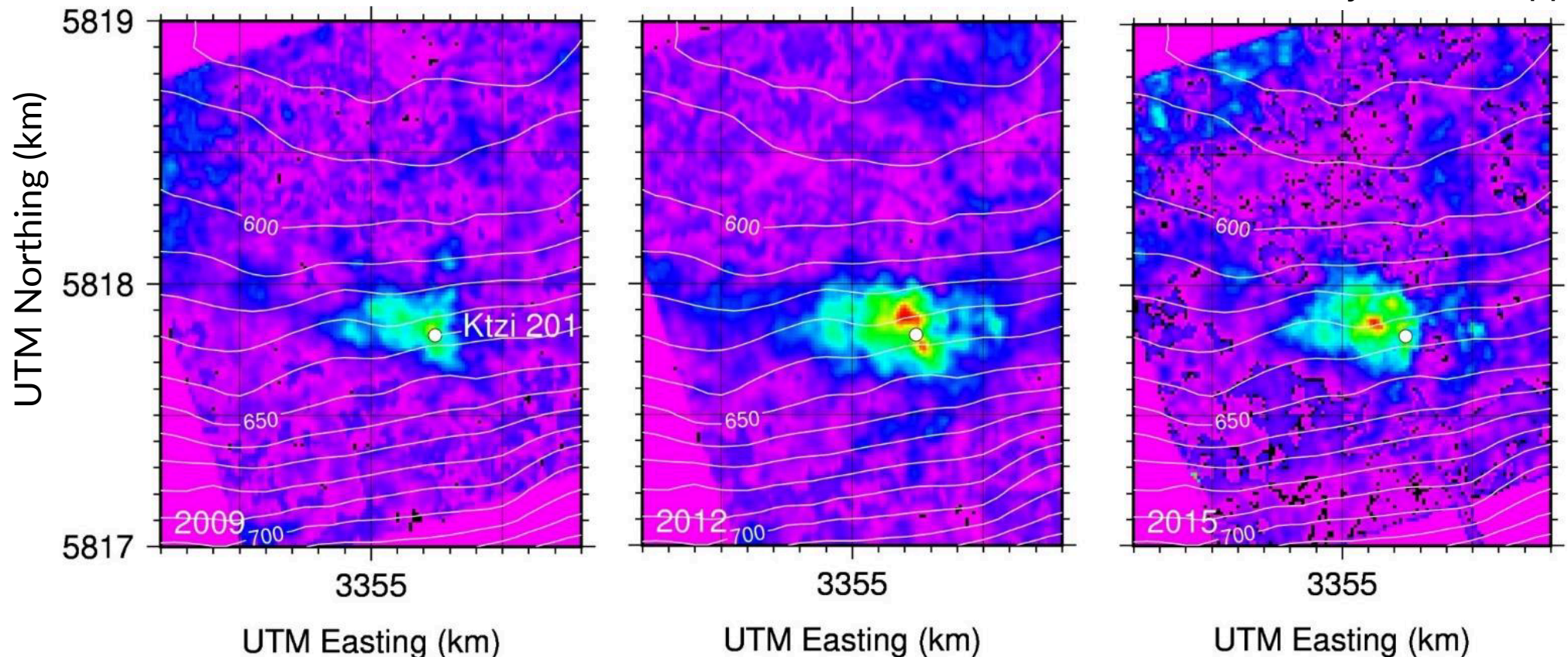
Ergebnis Seismische 3D Amplituden

2009: ~23.000 t

2012: ~61.000 t

2015: ~67.000 t

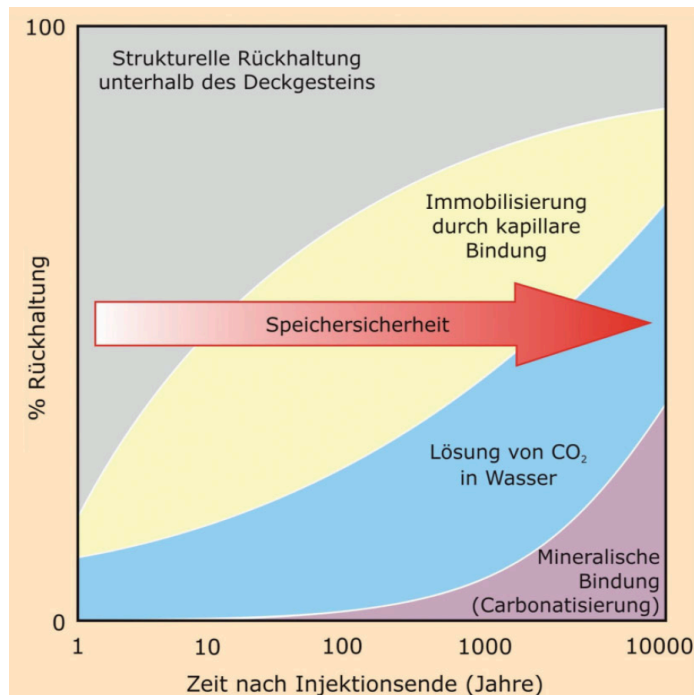
2 Jahre nach Injektionsstopp



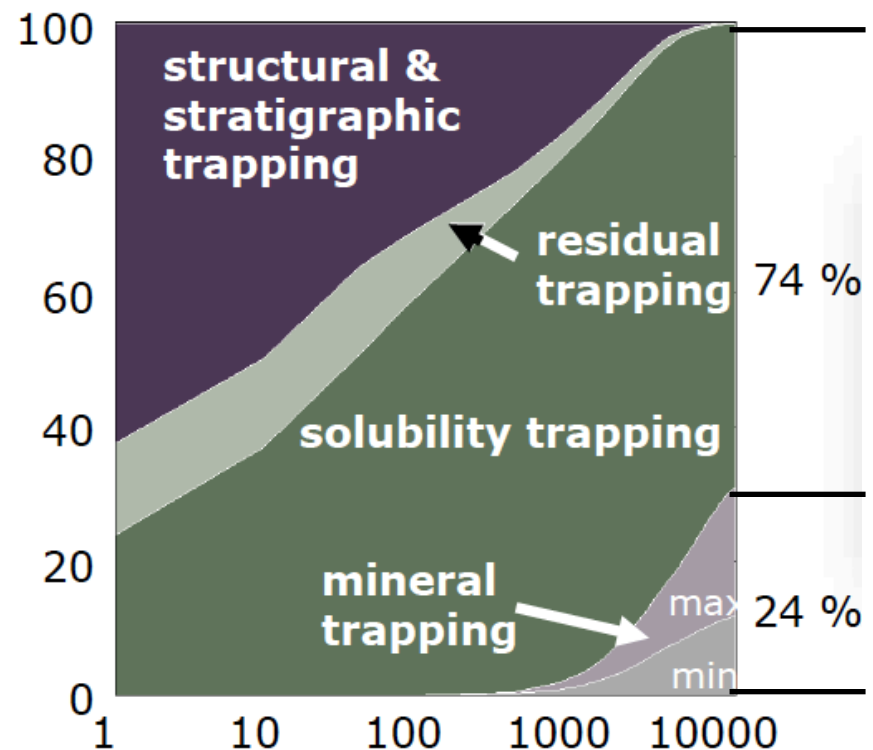
Nachweis der sicheren und verlässlichen CO₂-Speicherung an Land
(bei einer Rate von ca. 15 kt/Jahr)

Ketzin - was haben wir gelernt?

Erwartete zeitliche Entwicklung



Ketzin pilot site



Rückhaltemechanismus aus **CO₂-Löslichkeit** für Ketzin (post-inject.) höher als anfangs abgeschätzt.

Mineralisierung beginnt direkt nach Stopp der Injektion.

Der zuerst gebildete Calcit wurde wieder instabil und löste sich fast vollständig auf.

Siderit ist das erste Karbonat, das stabil bleibt (9-Jahre Exposition CO₂-dotierte Salzlake).

Sleipner - das Vorzeigeprojekt

Betreiber: Equinor (Statoil, Norwegen)

Standort: Nordsee, aktiv seit 1996

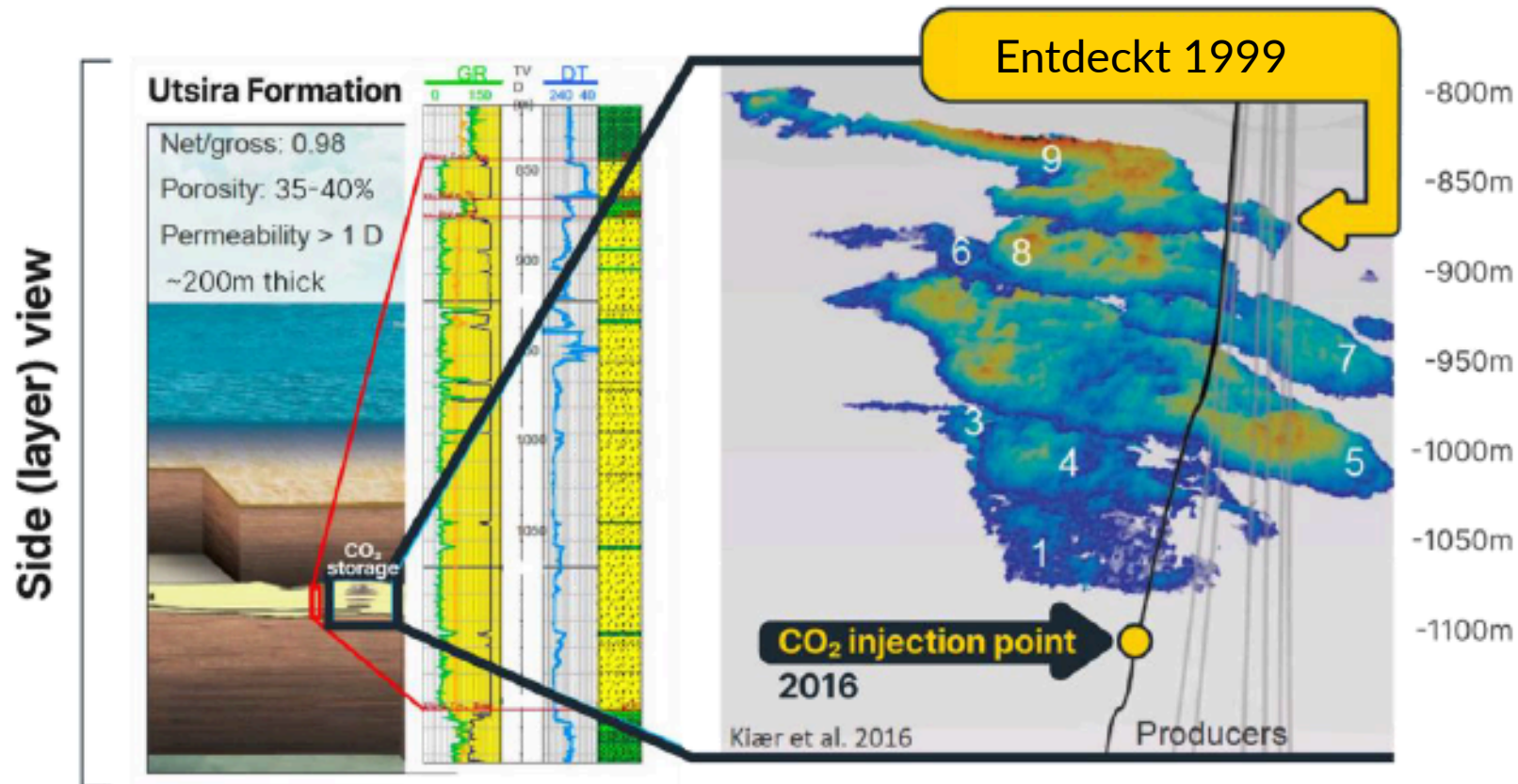
CO₂-Speicherung: 0,85 Mt/a - 1 Mt/a

Monitoring

Permanent: Temperatur, Druck am Bohrkopf

Periodisch: 3D seismische Messungen (10 in 20 Jahren)

Gravimetrische Messungen (4 in 20 Jahren)



Source: Geological storage of CO₂: project design and global scale-up. Ringrose. March 29, 2021.

In Salah - ehemaliges Vorzeigeprojekt

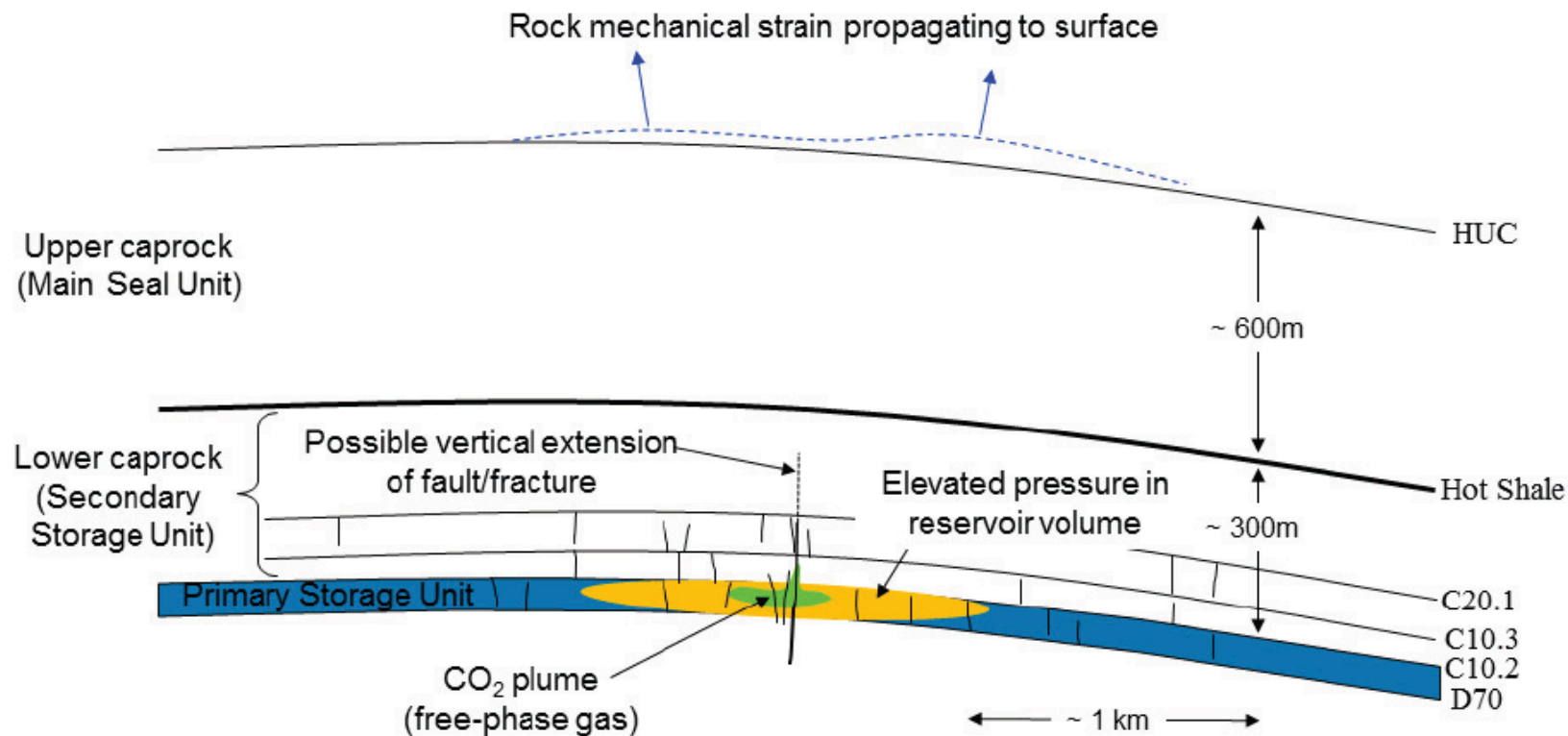
Standort: Algerien, bei In Salah, Start 2004

Starker Druckanstieg 2009

CO₂-Speicherung: ~1 Mt/a

Absenken der Injektionsrate 2010

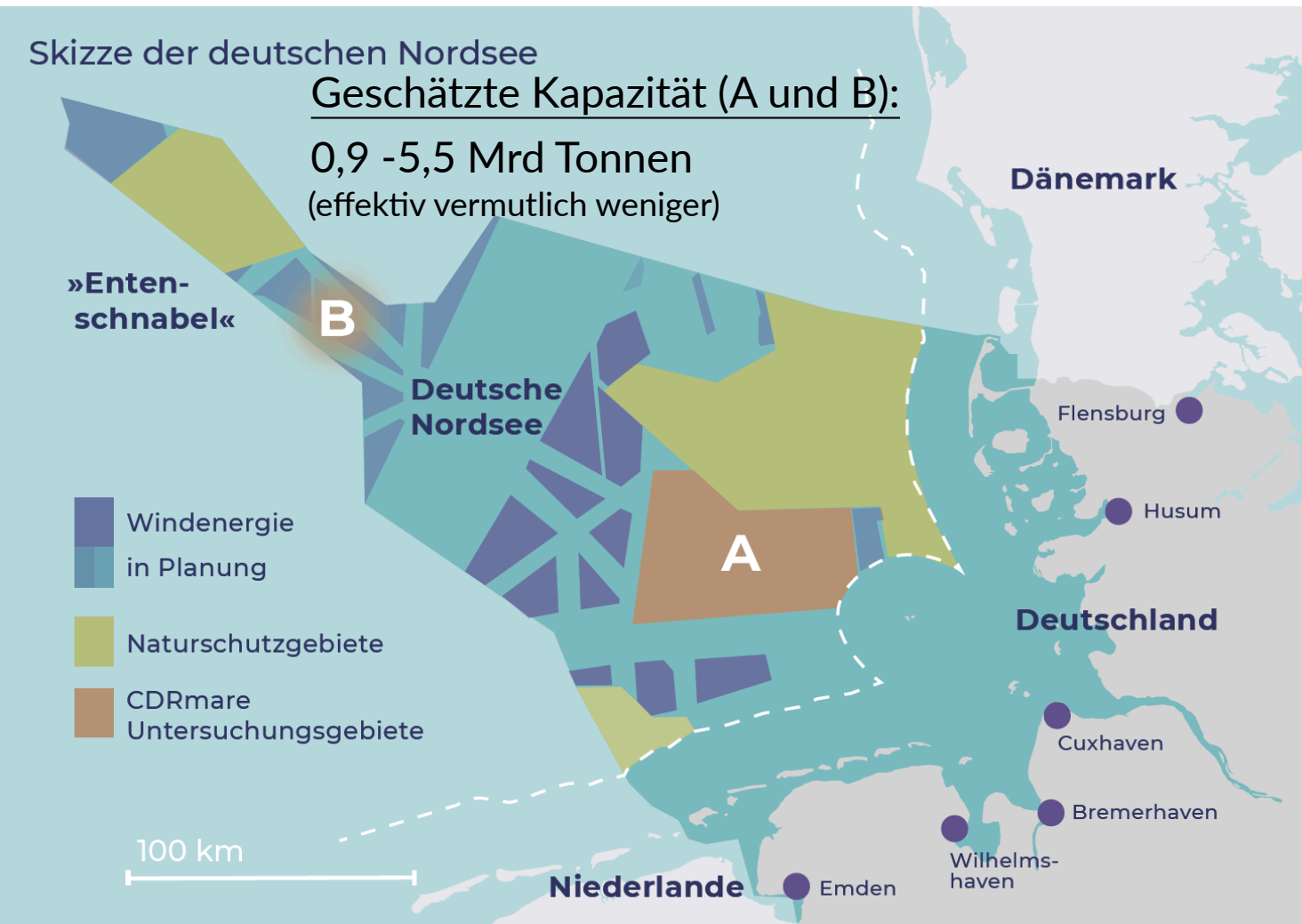
Boden hebt sich um ca. 2,5 cm => Abbruch 2011



Untermeerische Speicherkapazität

Deutschland: Nordsee

Speicherung in Buntsandstein



Studie: 10 Mio t/a für
30 Jahre in Gebiet A

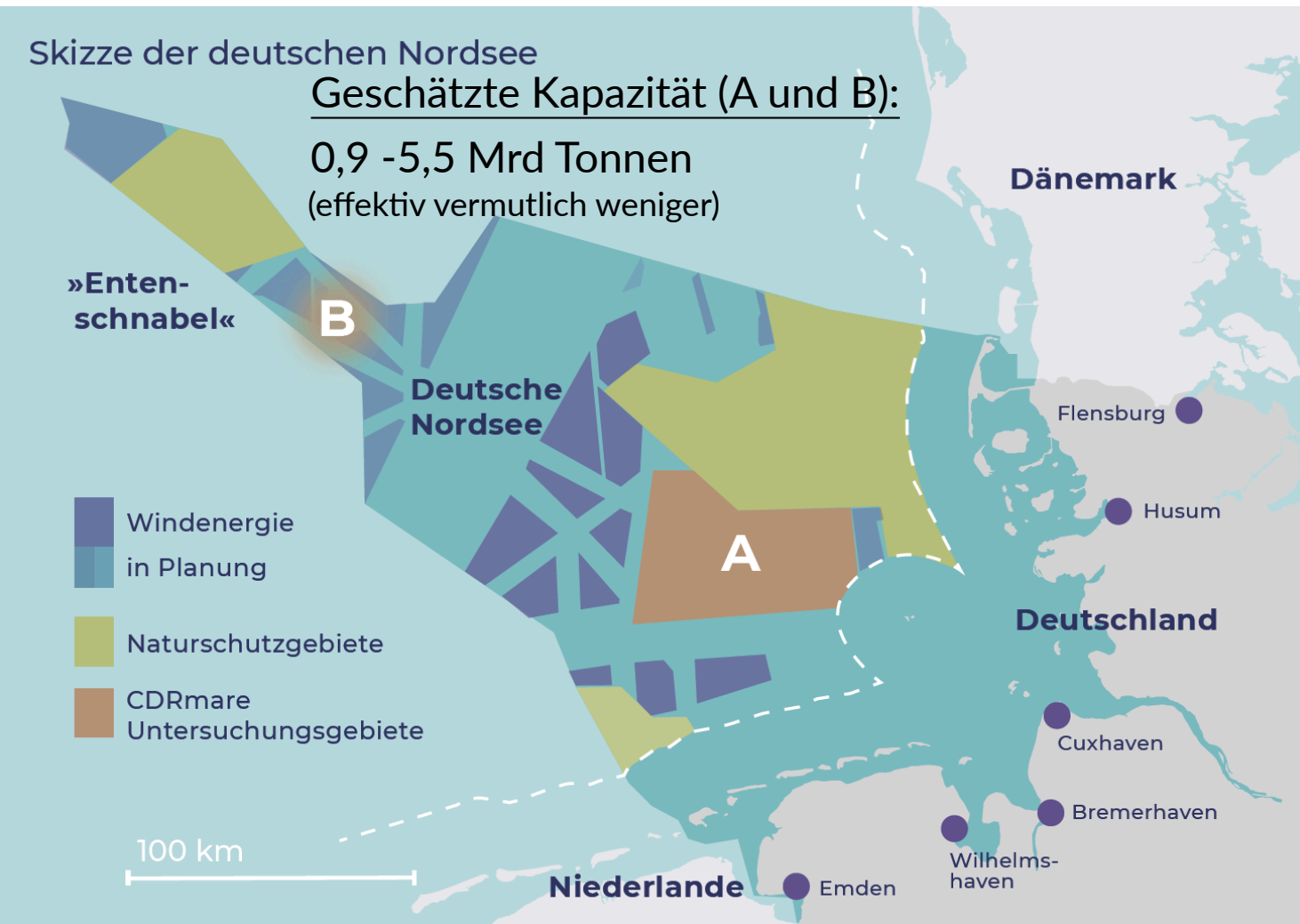
Dafür sind mehrere
Bohrungen nötig

Seismische Überwachung
beeinträchtigt
Schweinswale

Untermeerische Speicherkapazität

Deutschland: Nordsee

Speicherung in Buntsandstein



Studie: 10 Mio t/a für
30 Jahre in Gebiet A

Dafür sind mehrere
Bohrungen nötig

Seismische Überwachung
beeinträchtigt
Schweinswale

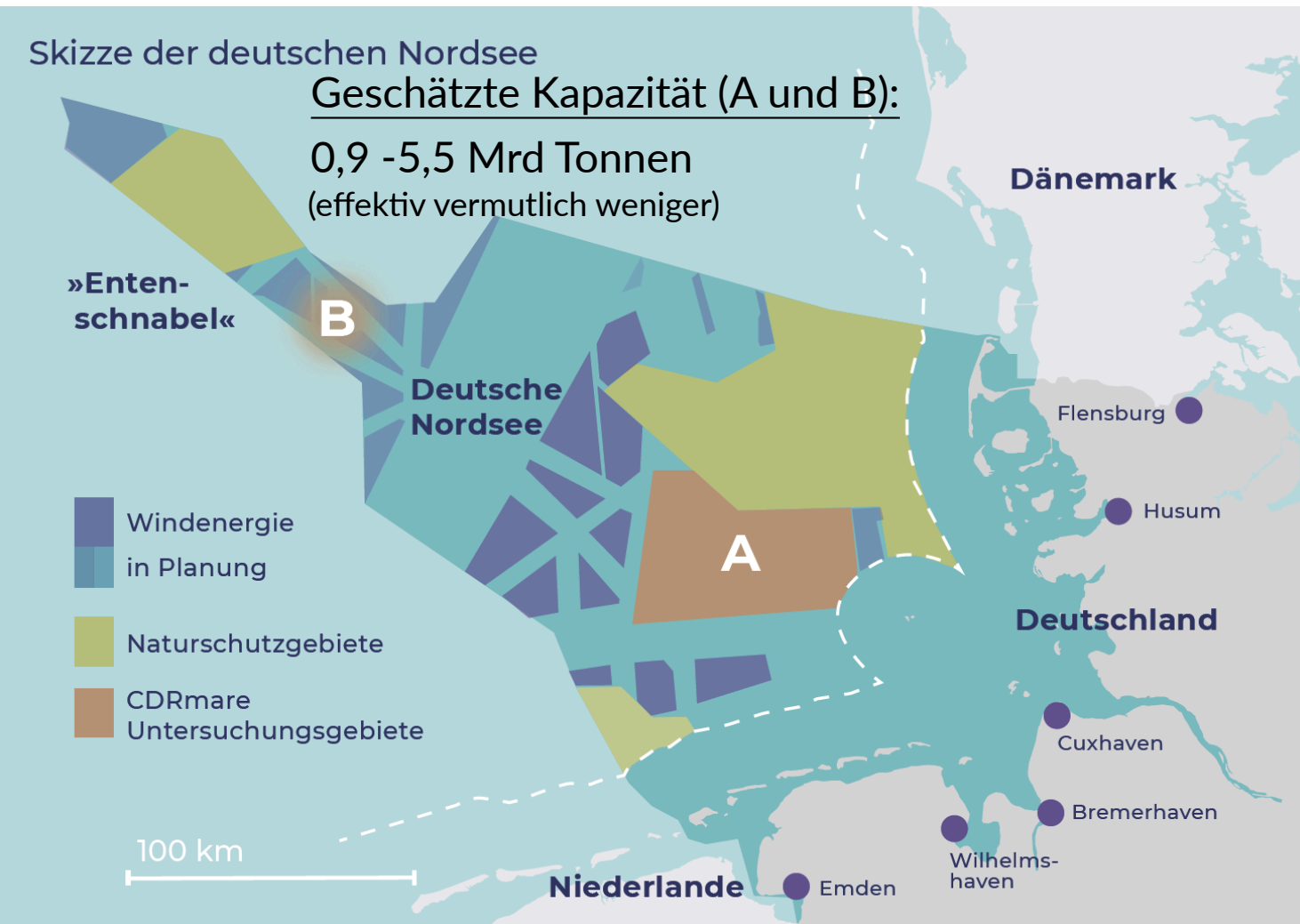
Weltweite Speicherkapazität:
1460 GtCO₂

M. J. Gidden et al., Nature 645, 124 (2025),
Open access

Untermeerische Speicherkapazität

Deutschland: Nordsee

Speicherung in Buntsandstein



Studie: 10 Mio t/a für
30 Jahre in Gebiet A

Dafür sind mehrere
Bohrungen nötig

Seismische Überwachung
beeinträchtigt
Schweinswale

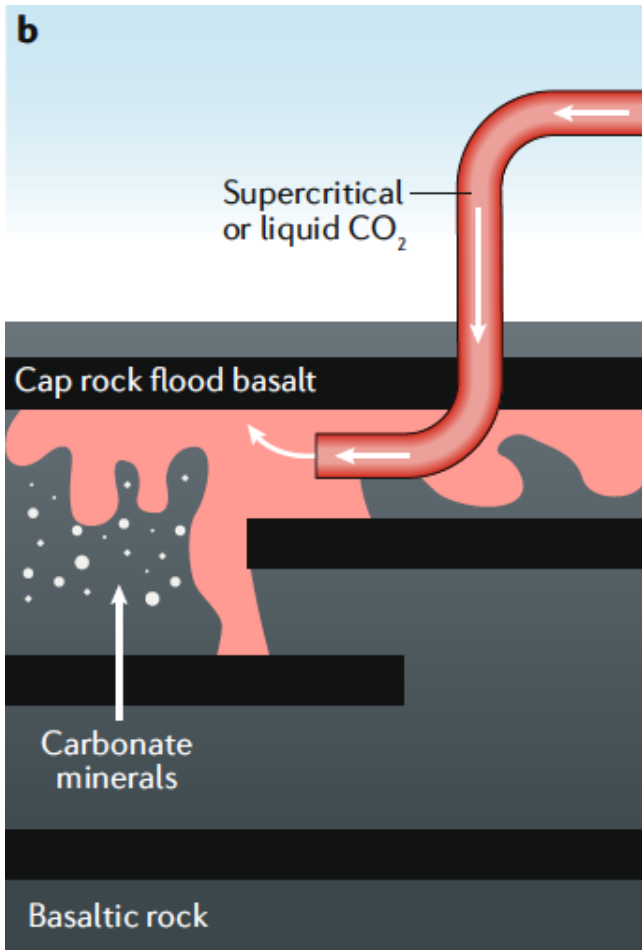
Weltweite Speicherkapazität:
1460 GtCO₂

M. J. Gidden et al., Nature 645, 124 (2025),
Open access

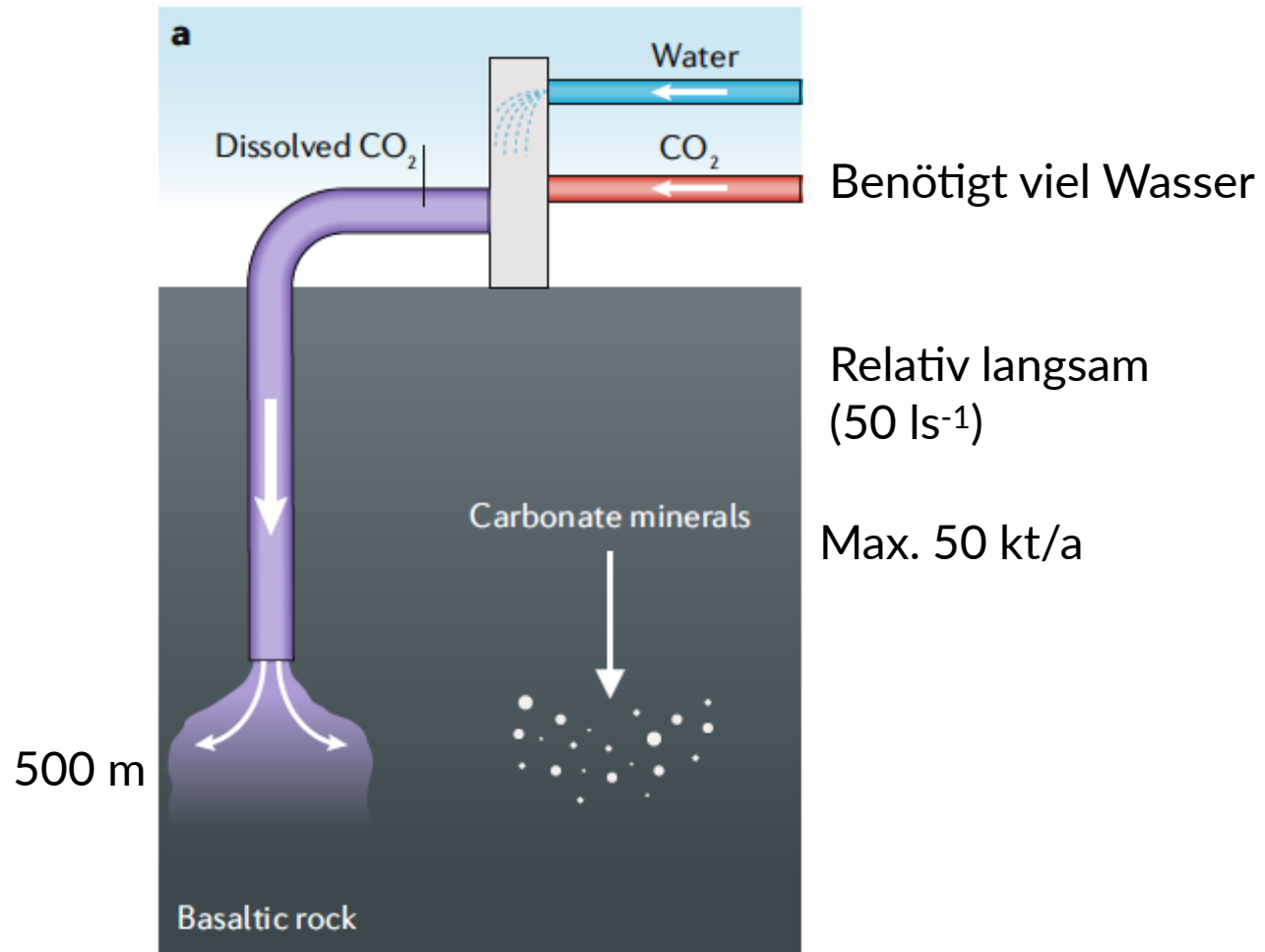
potential of 0.7°C reduction
of global heating

Speichermethoden

Superkritisches CO₂



CO₂ wird direkt in Wasser gelöst



Schnelle Mineralisierung

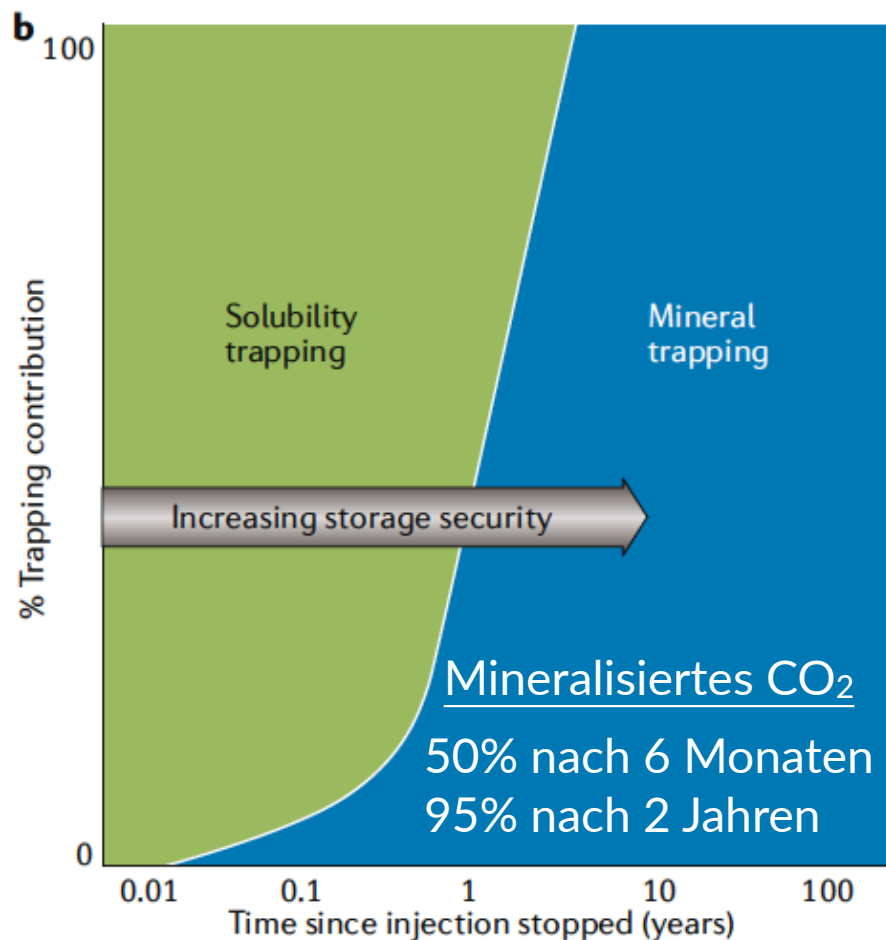
Betreiber: Climeworks (Carbfix)

CO₂-Speicherung: 4 kT/a (ORCA)

Seit Mai 2024: + 36 kT/a (Mammoth)

CO₂ - Abscheidung aus der Luft

Echte! „Negativ-Emissionen“



Schnelle Mineralisierung

Betreiber: Climeworks (Carbfix)

CO₂-Speicherung: 4 kT/a (ORCA)

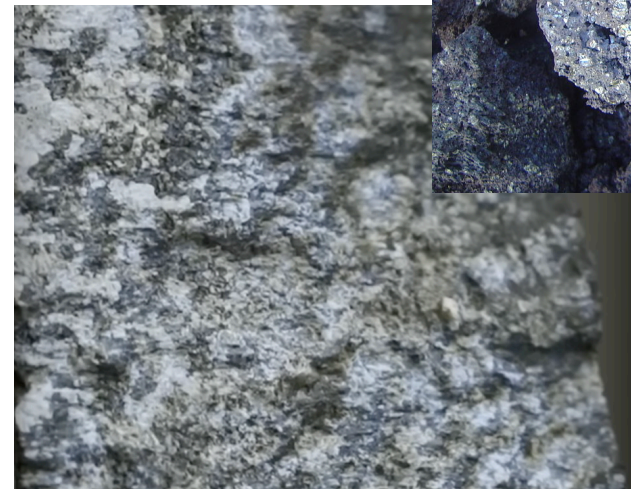
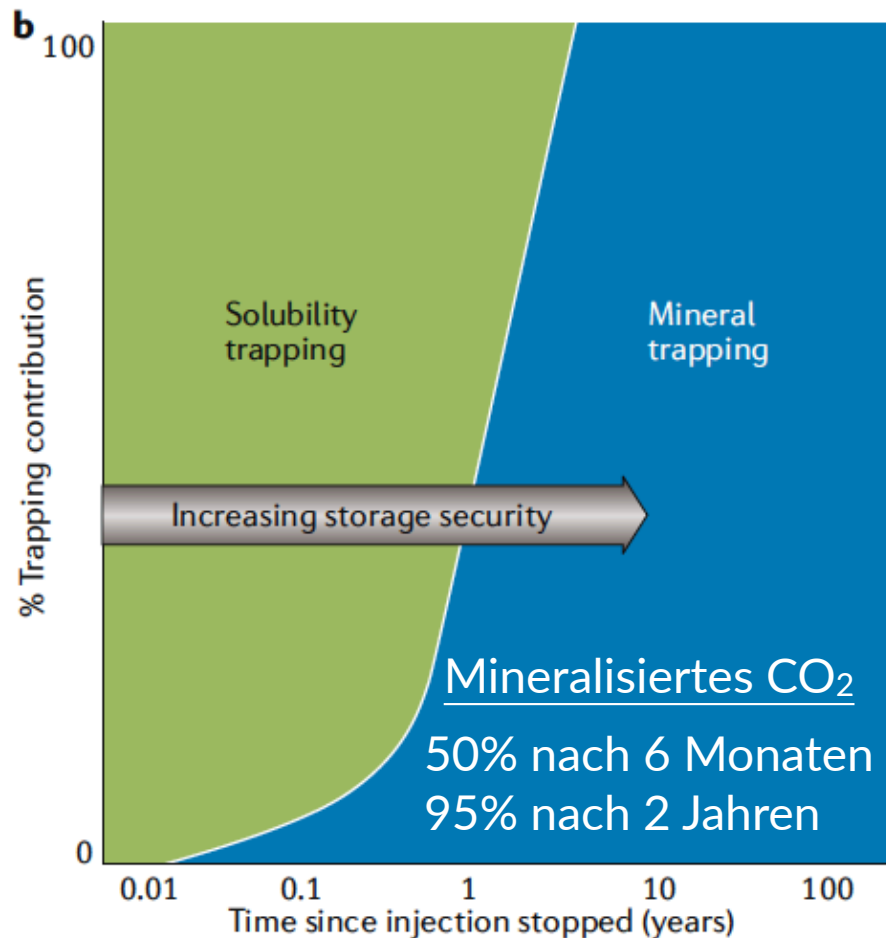
Seit Mai 2024: + 36 kT/a (Mammoth)

CO₂ - Abscheidung aus der Luft

Echte! „Negativ-Emissionen“

Basalt mit hoher Konzentration von
Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺

©David.Monniaux, CC BY-SA 3.0



Basalt mit mineralisiertem CO₂

Schnelle Mineralisierung

Betreiber: Climeworks (Carbfix)

CO₂-Speicherung: 4 kT/a (ORCA)

Seit Mai 2024: + 36 kT/a (Mammoth)

Kapazität!

Realität:

ORCA (2023): 1,7 kT

Mammoth (erste 10 Monate): 105 Tonnen

Die Firma kann ihre eigenen Emissionen damit nicht kompensieren

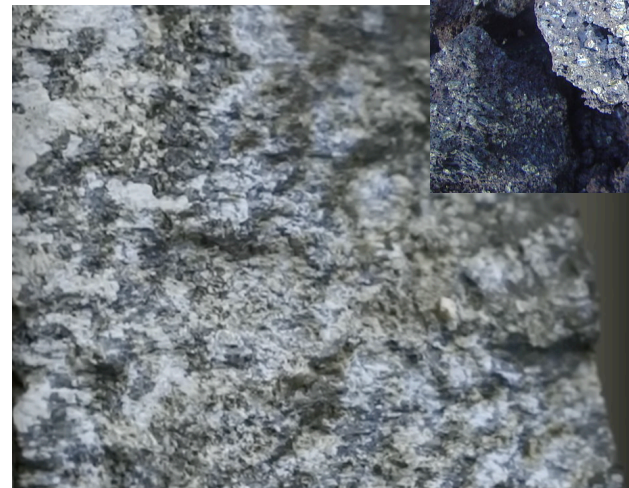
CO₂ - Abscheidung aus der Luft

Echte! „Negativ-Emissionen“

Basalt mit hoher Konzentration von

Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺

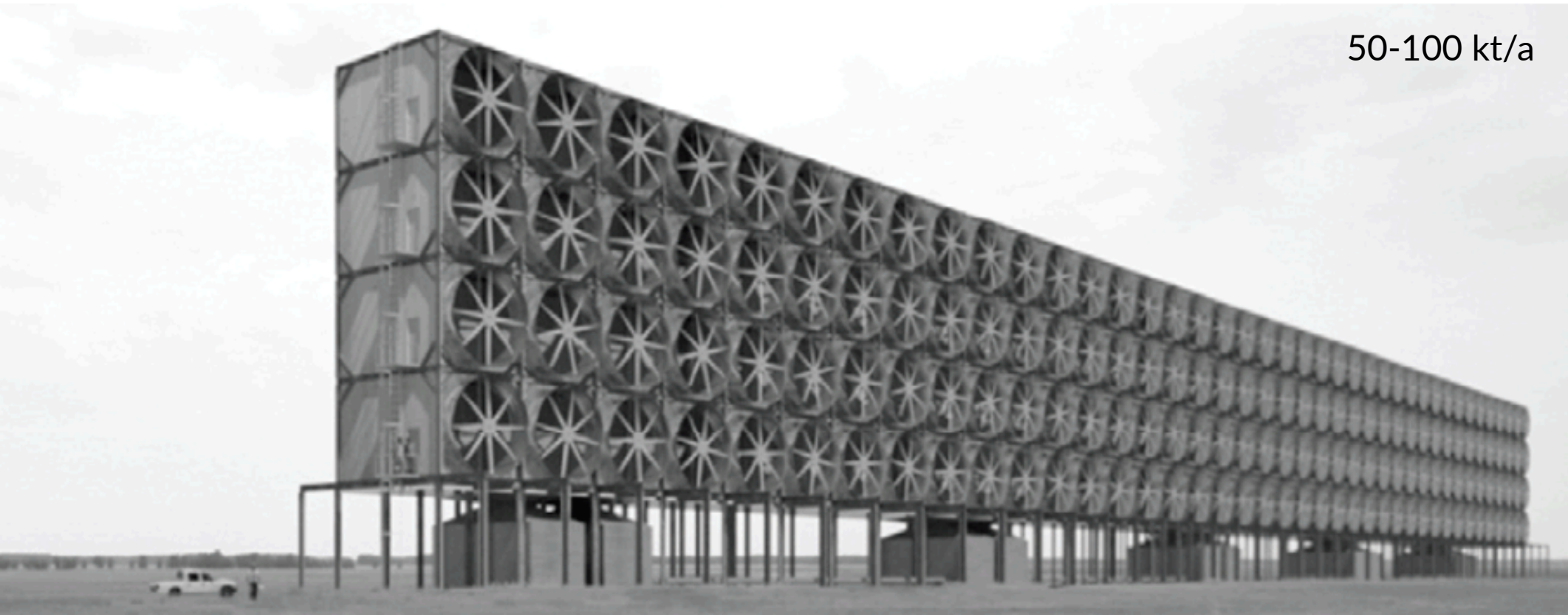
©David.Monniaux, CC BY-SA 3.0



Basalt mit mineralisiertem CO₂

Wie holt man CO₂ aus der Luft?

Mit riesigen Filteranlagen



50-100 kt/a

Für 1 Mt/a : 10-20 solcher Anlagen

Filtern eines Spurengases

CO₂ Anteil in Luft: ~400 ppm
(Stand Aug. 2025: 425.48 ppm)

1 m³ Luft enthält ~700 mg CO₂

Annahme: 80% Effektivität

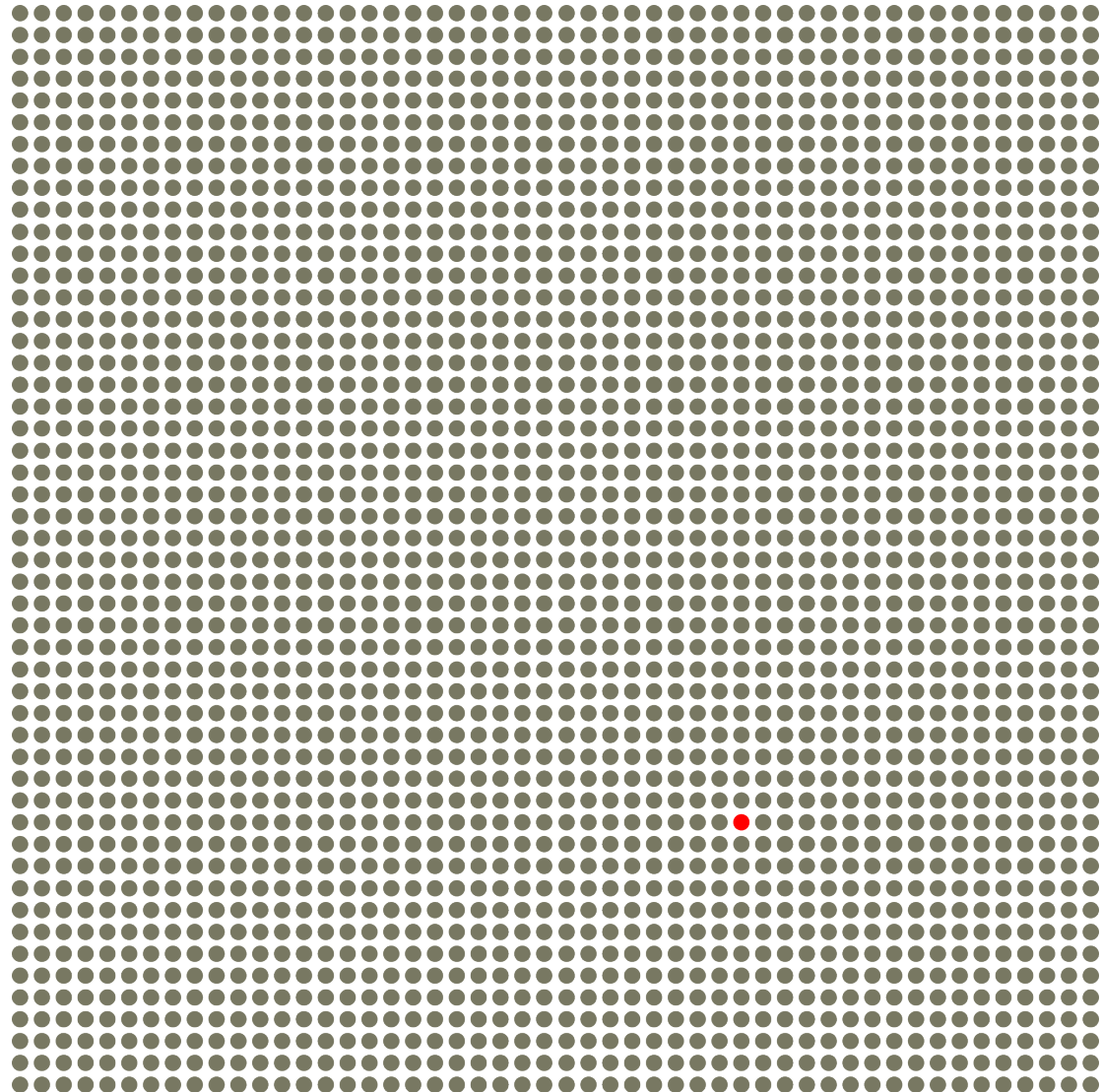
1785 m³ Luft für 1kg CO₂

Eine Filtereinheit

15 m³/s Volumenstrom

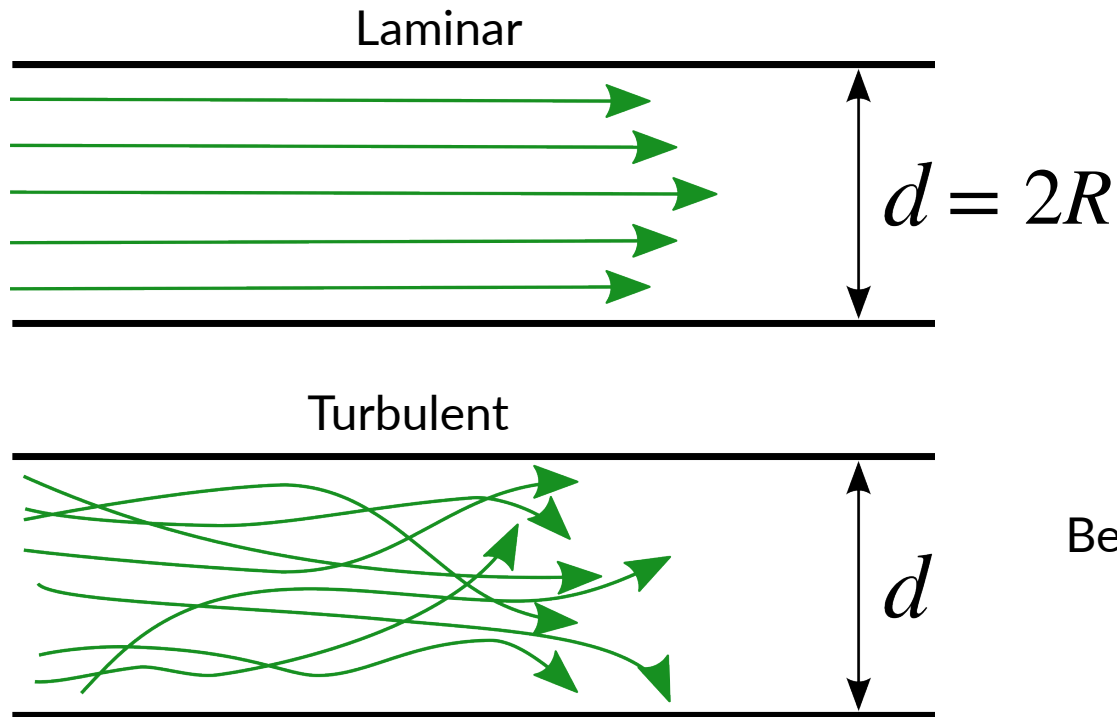
1kg CO₂ in 2 Minuten

~250 t/a



Strömungsmechanik

Möglichst geringer Energieaufwand:



Laminare Strömung

Begrenzung des Volumenstroms Q

Hagen-Poiseuille Gesetz

Druckabfall entlang Filter

$$\Delta p = \frac{8L\mu Q}{\pi R^4}$$

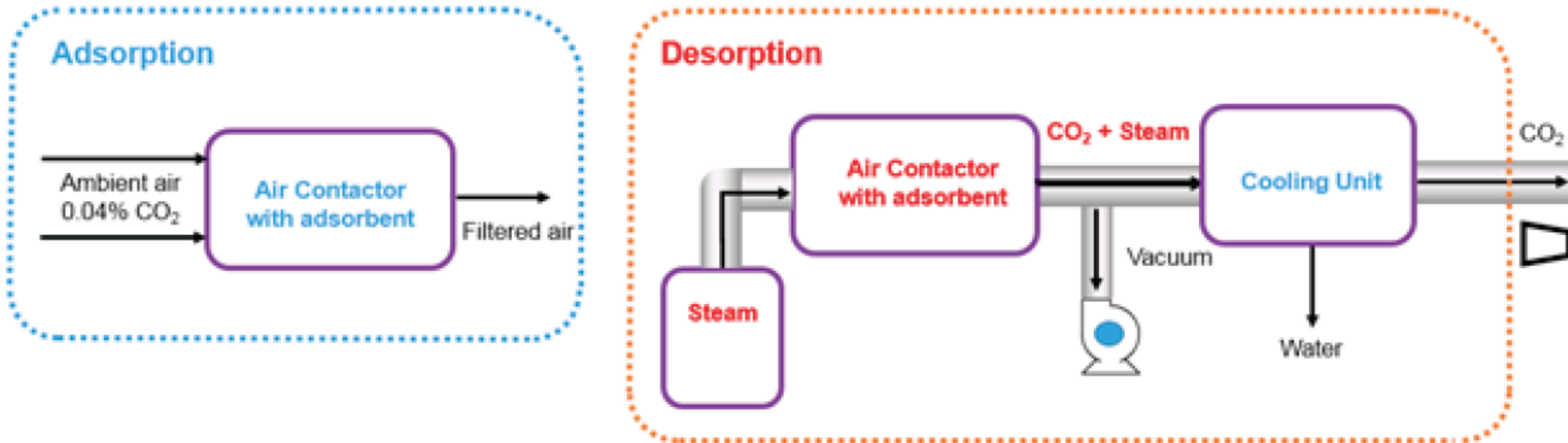
μ : Viskosität
 L : Länge
 R : Radius

Benötigte elektrische Leistung für Ventilator

$$P_{el} \propto Q\Delta p$$

CO₂-Abtrennung mit Feststoff-Filter

Temperature Vacuum Swing Adsorption (TVSA)



Abschätzung der energetischen Kosten:

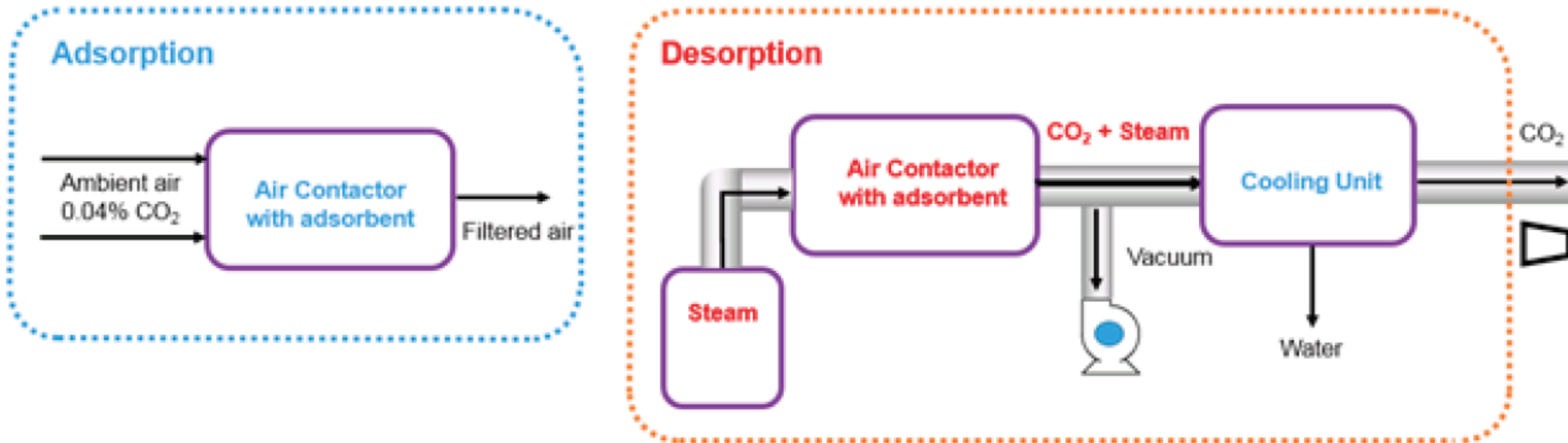
Realistische Schätzung: 4 - 6 GJ/t CO₂. (1100 kWh - 1700 kWh)

„Beste“ Schätzung: 0.45 GJ/t CO₂. (125 kWh)

Größter Energieverbrauch durch Desorption

CO₂-Abtrennung mit Feststoff-Filter

Temperature Vacuum Swing Adsorption (TVSA)



Abschätzung der energetischen Kosten:

60 Mt/a

Realistische Schätzung: 4 - 6 GJ/t CO₂. (1100 kWh - 1700 kWh)

66 - 102 TWh

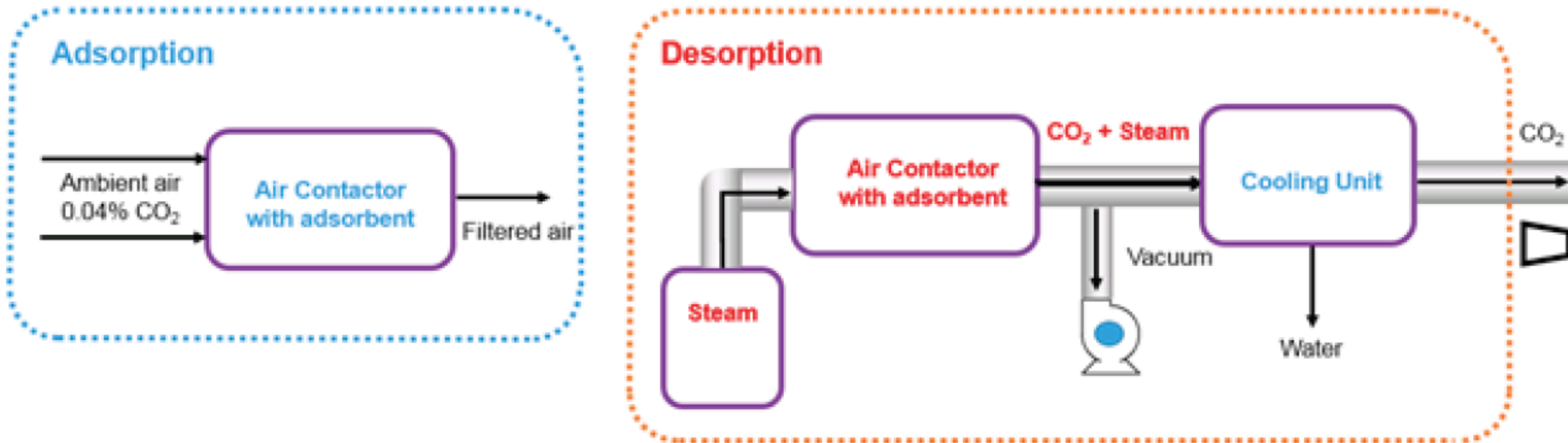
„Beste“ Schätzung: 0.45 GJ/t CO₂. (125 kWh)

7,5 TWh

Größter Energieverbrauch durch Desorption

CO₂-Abtrennung mit Feststoff-Filter

Temperature Vacuum Swing Adsorption (TVSA)



Abschätzung der energetischen Kosten:

60 Mt/a

Realistische Schätzung: 4 - 6 GJ/t CO₂. (1100 kWh - 1700 kWh)

66 - 102 TWh

„Beste“ Schätzung: 0.45 GJ/t CO₂. (125 kWh)

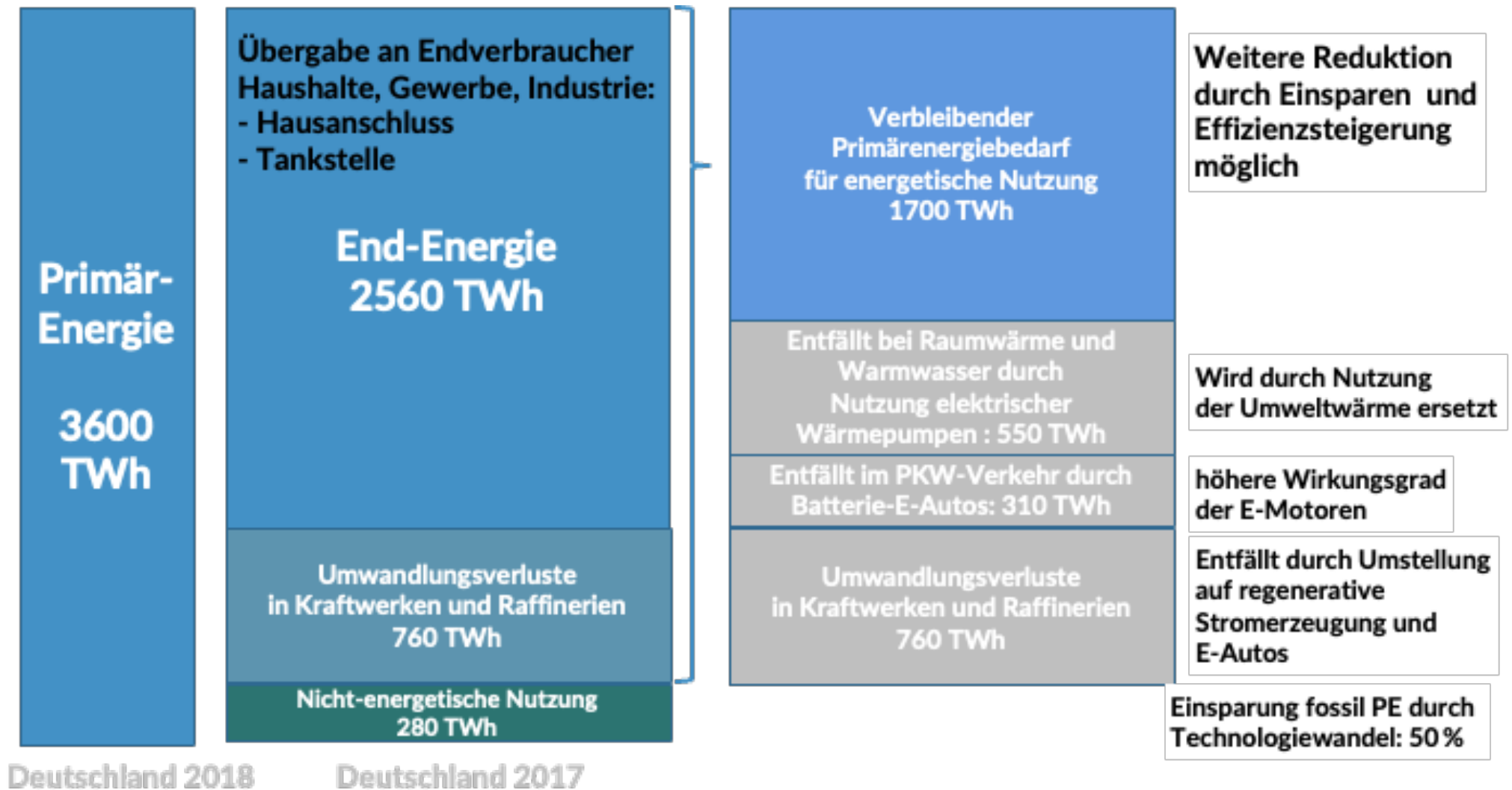
7,5 TWh

Größter Energieverbrauch durch Desorption

Stromproduktion Deutschland/a ~500 TWh

Primär- und Endenergieverbrauch

- Deutschland in TWh



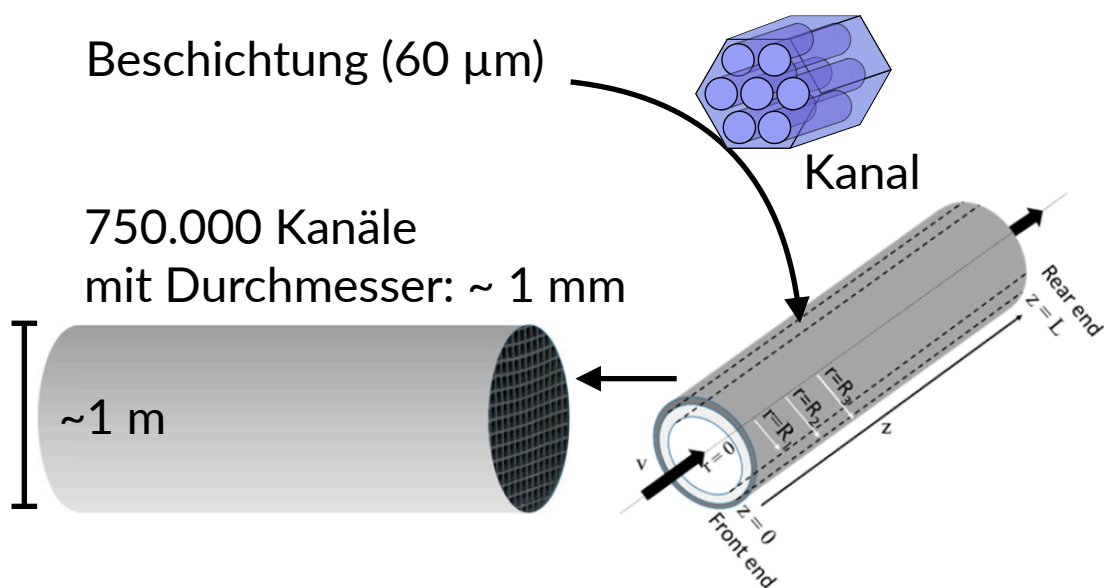
Filtermaterialien

Poröses Material (große Oberfläche) mit Aminogruppen

Metallorganische Gerüstverbindungen
(Metal-organic frameworks, MOFs)

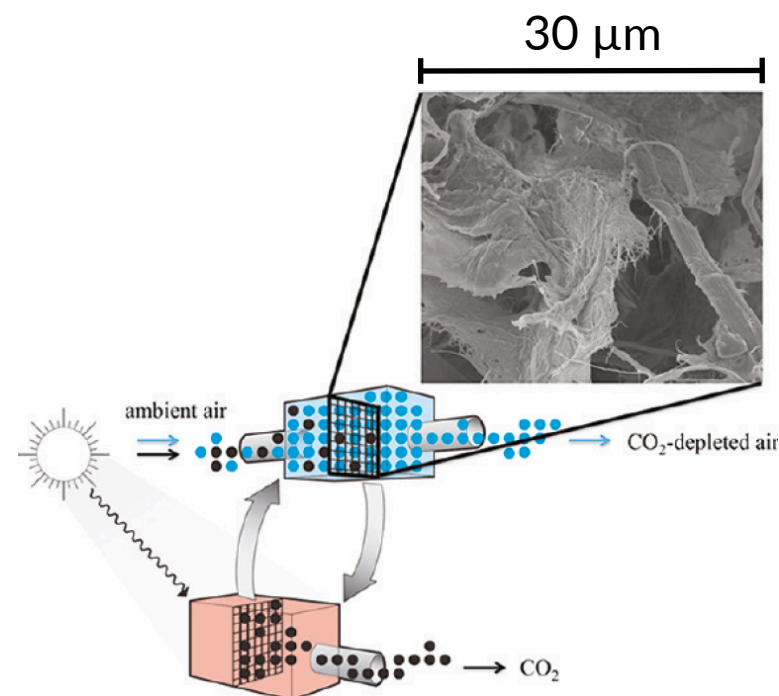
Beschichtung (60 μm)

750.000 Kanäle
mit Durchmesser: $\sim 1\text{ mm}$



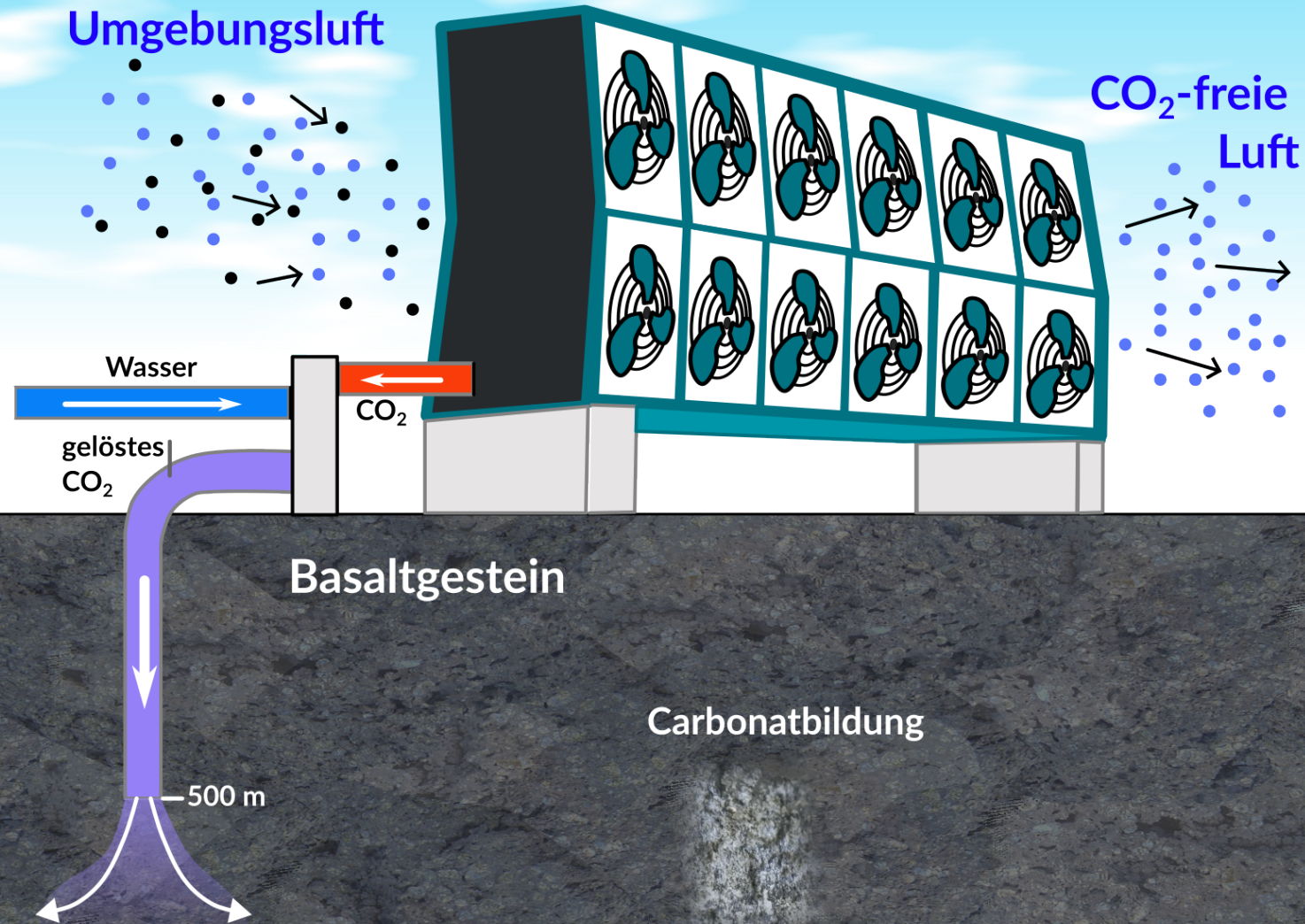
Sinah et al, Ind. Eng. Chem. Res. 56, 750–764 (2017)

Cellulose funktionalisiert mit Aminosilan



Gebald et al, Environ. Sci. Technol. 45, 9101–9108 (2011)

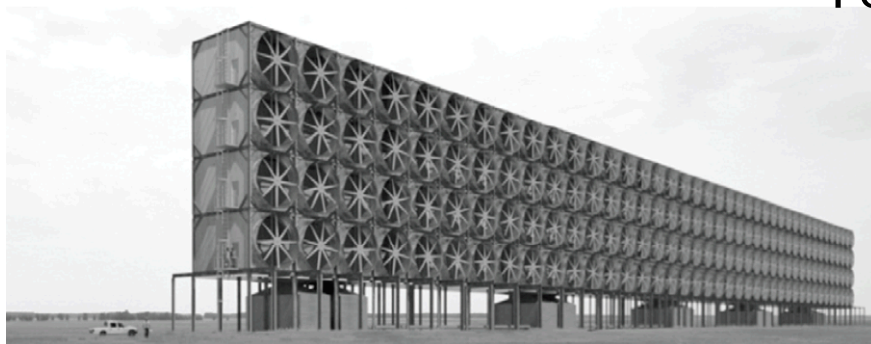
DACCS



Zusammenfassung



- Einlagerung von CO₂ ist sicher, weil CO₂ zu Gestein mineralisiert
 - Geschieht schneller als erwartet (Ketzin)
 - Lösung in Salzwasser effizienter als erwartet (Ketzin)
 - CO₂/Wasser Gemisch: nach 2 Jahren 95% mineralisiert (Carbfix)
- Während der Einspeisung kann es zu Verschiebungen im Gestein kommen
 - Aufwändiges Monitoring nötig (Ketzin)
 - Es kann (vermutlich) nur in Raten ≤ 1 Mt/a CO₂ eingespeist werden
 - Nordsee Speicherkapazität: ca. 10 Mt/a für 30 Jahre
- Filtern eines Spurengases ist (energetisch) sehr aufwändig
 - Festkörper-Adsorption mit Entwicklungspotenzial
 - Kombination mit Flüssigverfahren möglich (usage)
 - Anlagen haben noch Probleme mit Prozesstechnik



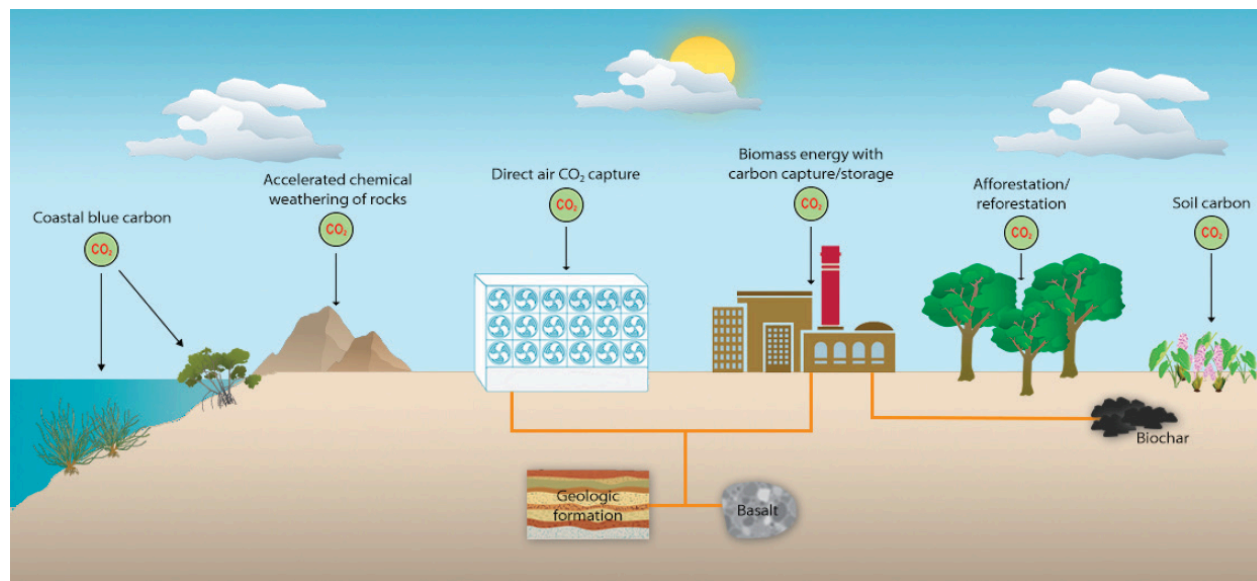
Schlussfolgerungen

Speicherkapazitäten weltweit stark begrenzt (limitierte Ressource):

Insgesamt sind CCS Technologien nur für unvermeidbare Restemissionen sinnvoll

Risikoabwägung in Vergleich zu schwerwiegenden Auswirkungen des Klimawandels

Auch andere Möglichkeiten der Reduzierung des CO₂ Gehaltes der Atmosphäre (CDR) ausloten



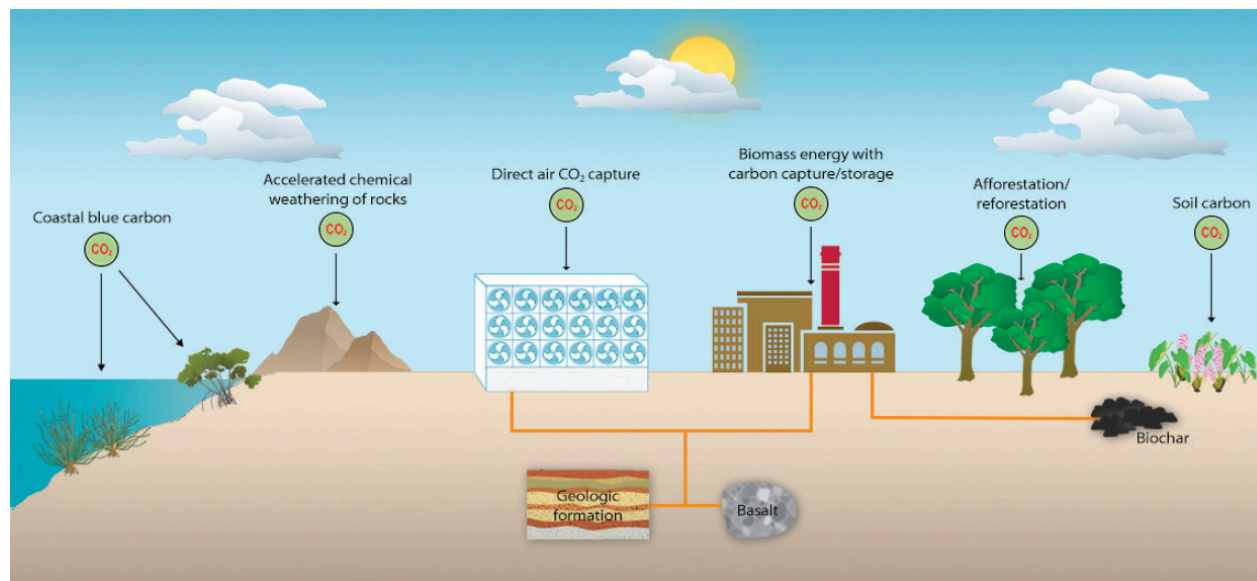
Schlussfolgerungen

Speicherkapazitäten weltweit stark begrenzt (limitierte Ressource):

Insgesamt sind CCS Technologien nur für unvermeidbare Restemissionen sinnvoll

Risikoabwägung in Vergleich zu schwerwiegenden Auswirkungen des Klimawandels

Auch andere Möglichkeiten der Reduzierung des CO₂ Gehaltes der Atmosphäre (CDR) ausloten



CO₂ Emissionen so schnell und weitgehend wie möglich stoppen