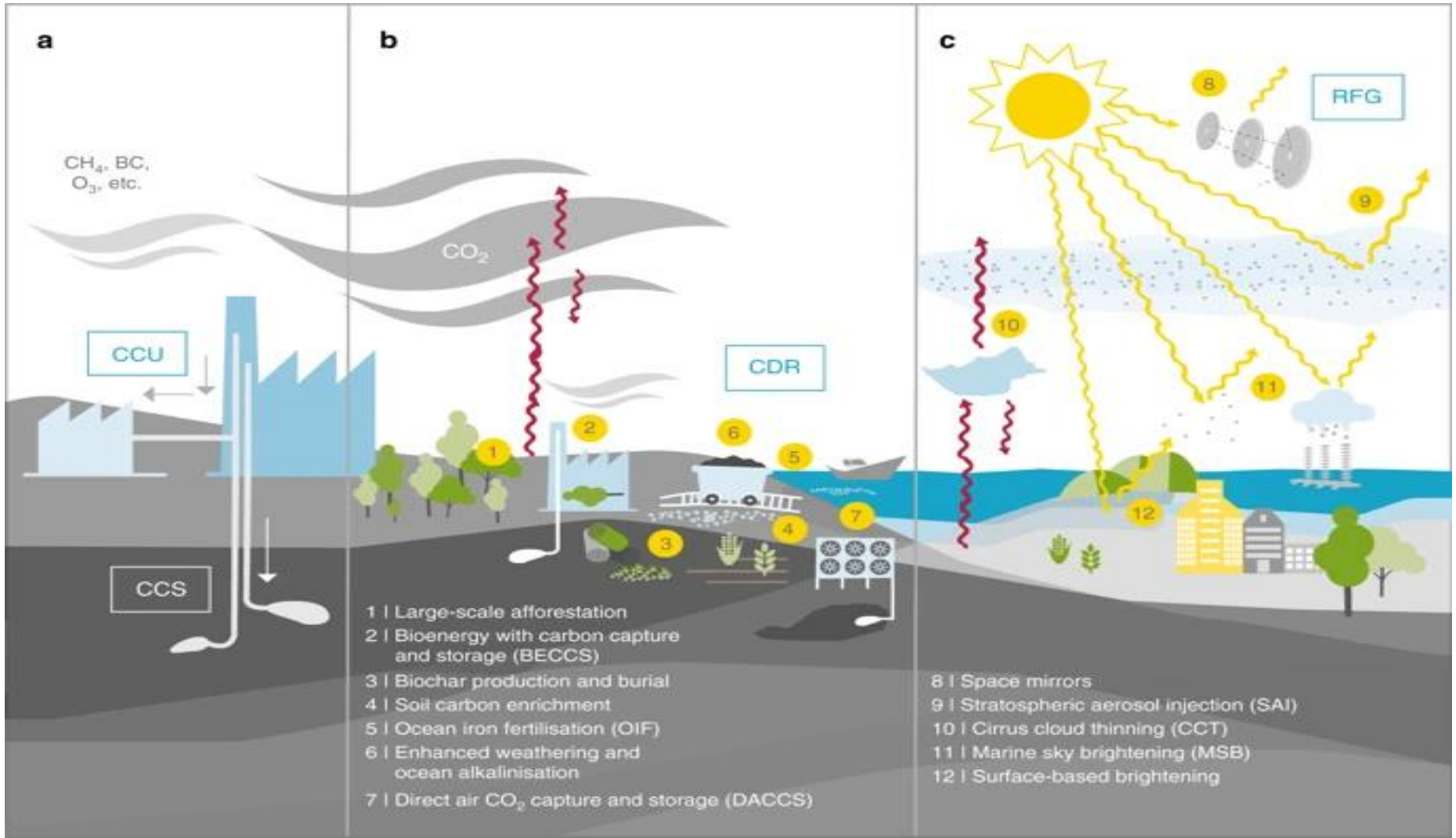
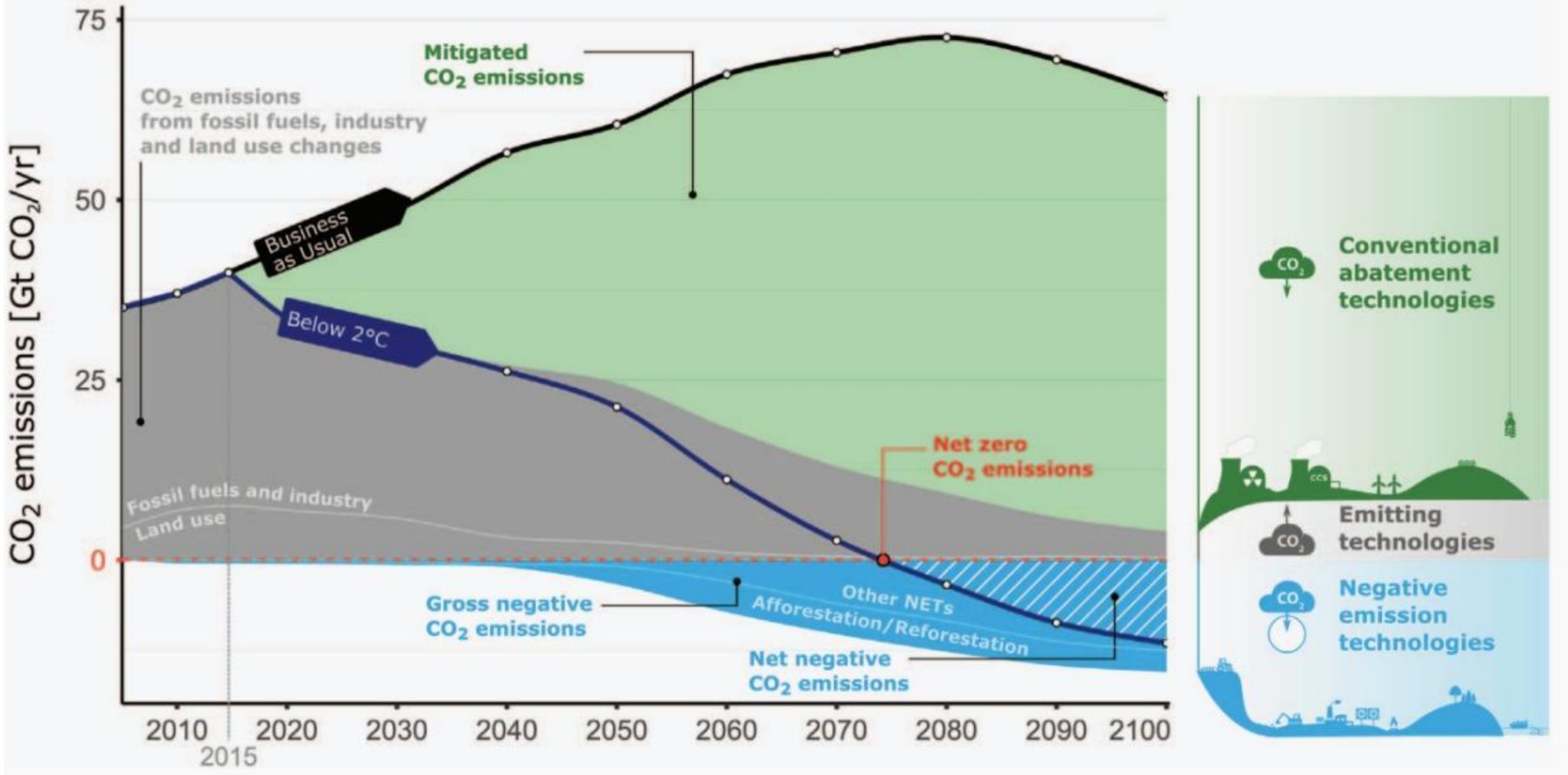
# Die (Un-)Möglichkeit von Geoengineering



James Hansen, Valerie Masson-Delmotte et al. 2008: zeigen mittels Paläoklimatologie, dass bei $CO_2$ Wert oberhalb von 350 ppm auf Dauer und bei mehr als 450 ppm auch kurzfristig Übergang in Heißzeit (Crutzen, Schellnhuber, engl. Hothouse Earth) erfolgt: das muss unbedingt verhindert werden.



Aktueller Zyklus des IPCC=Weltklimarats: 6. Sachstandsbericht, noch in interner Kommentierungsphase, wichtig:

Neues Szenario ssp1-1.9 wurde eingeführt, um überhaupt noch +1,5 K gegenüber Holozän nicht überschreiten zu können
Nachfolgeszenario des früher besten RCP2.6 ist ssp1-2.6, reicht gerade noch, um +2K nicht zu überschreiten

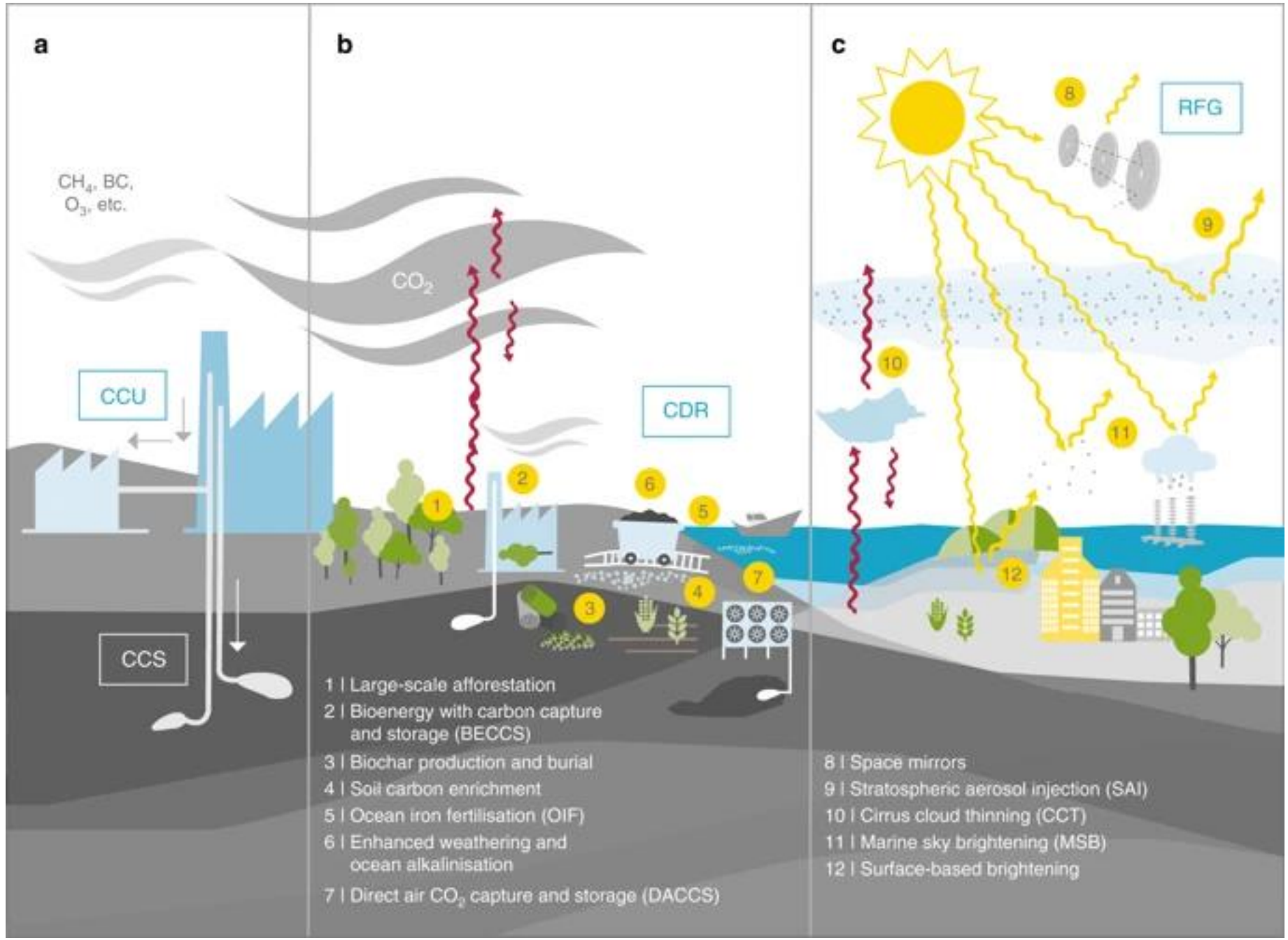
ssp = shared socioeconomic path, 1 bis 5, 1 ist geringe Ungleichheit, 5 große Ungleichheit
rcp = representative concentration path der Treibhausgase ($CO_2$ Äquivalent), Zahl ist zusätzlicher Strahlungsantrieb in $W/m^2$

Rahmstorf/Schellnhuber in „Der Klimawandel“: sinngemäß Geoengineering = dog‘s moonshine oder Hirngespinst

Manche Vorschläge klingen nicht von ungefähr wie Science Fiction.

Mark Lawrence et al. schätzten 2018, dass mindestens 0,6 $W/m^2$ nötig sind durch Geoengineering, um global zu helfen.

Politische Anmerkung: interessierte Kreise (i.W. Fossilindustrie) versuchen durch solche Vorschläge ihren lukrativen Weg der Verfeuerung fossiler Brennstoffe möglichst lange fortsetzen zu können!


a
b
c
$CH_4$, BC,
$O_3$, etc.
$CO_2$
CCU
CCS
CDR
RFG
1 | Large-scale afforestation
2 | Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)
3 | Biochar production and burial
4 | Soil carbon enrichment
5 | Ocean iron fertilisation (OIF)
6 | Enhanced weathering and ocean alkalinisation
7 | Direct air $CO_2$ capture and storage (DACCS)
8 | Space mirrors
9 | Stratospheric aerosol injection (SAI)
10 | Cirrus cloud thinning (CCT)
11 | Marine sky brightening (MSB)
12 | Surface-based brightening

Klassifikation der Ansätze:

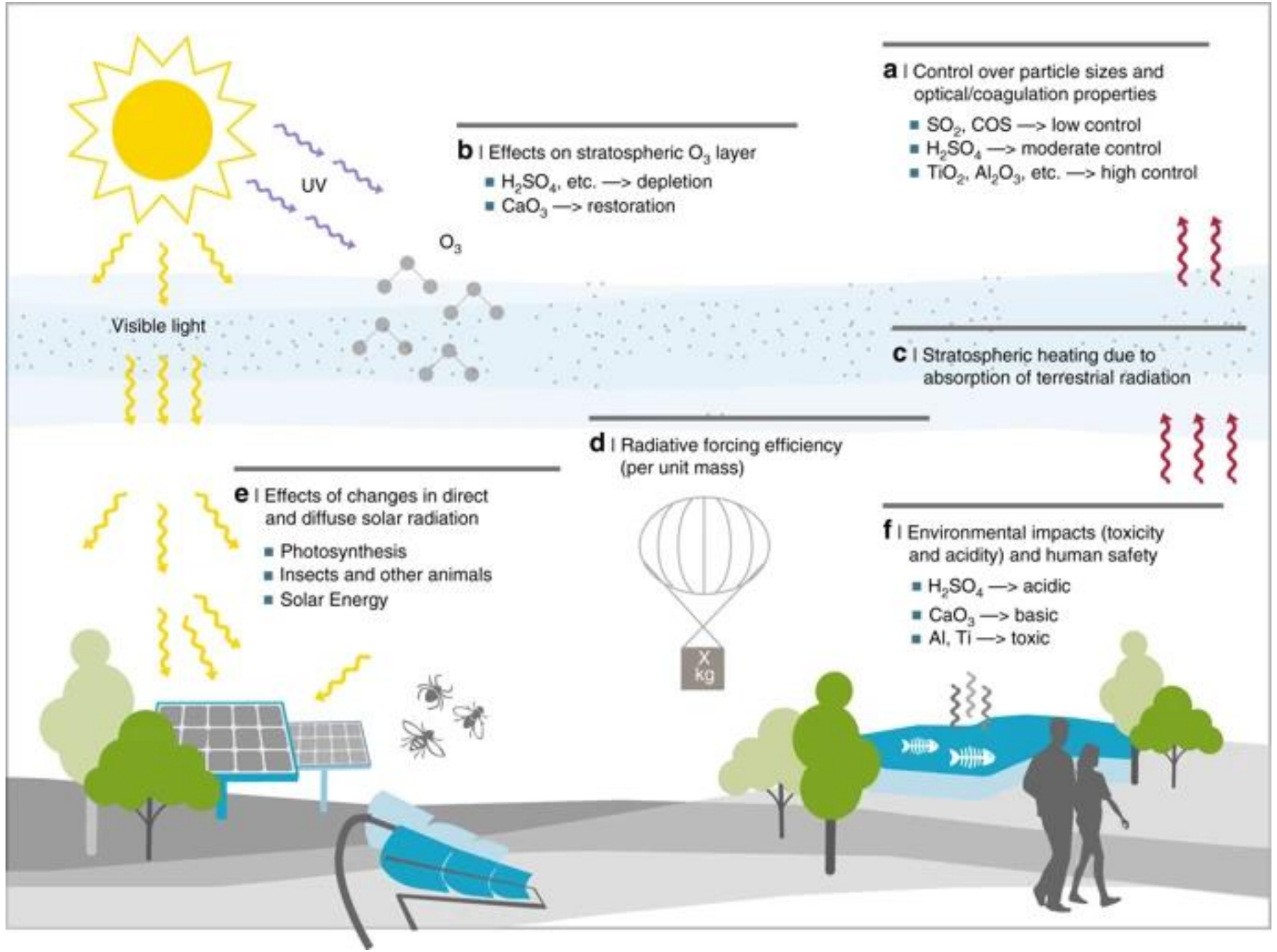
Entfernen von Treibhausgasen (i.W. $CO_2$) aus der Atmosphäre: CDR = Carbon Dioxide Removal
Eingriff in irdischen Strahlungshaushalt: RFG = Radiative Forcing Geoengineering

Genauere Einteilung:

RFG zerfällt in SRM = Solar Radiation Management, i.W. Reflexion von Sonnenlicht sowie (aktuell nur ein Verfahrensvorschlag) Erhöhung der Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung

CDR kann entweder technisch/geologisch bewerkstelligt werden mit physikalischen oder chemischen Verfahren oder
Ablagerung von Kohlenstoffdioxid in biologischen Systemen

Tendenziell können RFG-Verfahren schneller greifen, CDR-Methoden brauchen typischerweise viel Zeit und Geduld


UV
Visible light
$O_3$
**a** | Control over particle sizes and optical/coagulation properties
$SO_2$, COS —> low control
$H_2SO_4$ —> moderate control
$TiO_2$, $Al_2O_3$, etc. —> high control
**b** | Effects on stratospheric $O_3$ layer
$H_2SO_4$, etc. —> depletion
$CaO_3$ —> restoration
**c** | Stratospheric heating due to absorption of terrestrial radiation
**d** | Radiative forcing efficiency (per unit mass)
X kg
**e** | Effects of changes in direct and diffuse solar radiation
Photosynthesis
Insects and other animals
Solar Energy
**f** | Environmental impacts (toxicity and acidity) and human safety
$H_2SO_4$ —> acidic
$CaO_3$ —> basic
Al, Ti —> toxic

## Stratospheric Aerosol Injection (SAI) - SRM

Der am meisten diskutierte Vorschlag hat auf jeden Fall erhebliche Nebenwirkungen:

- Toxische Stoffe oder durch chemische Reaktion entstehende schädliche Stoffe wie Schwefelsäure
- Waldschäden durch $H_2SO_3$ und $H_2SO_4$ möglich (Erinnerung: Kohleverbrennung ohne Rauchgasentschwefelung)
- Abschattungseffekte auf Solarpaneele, Pflanzen und Tiere sind zu untersuchen
- Stratosphärenerwärmung und v.a. bei Schwefelverbindungen Ozonabbau sind möglich

Praktisch ist das Projekt auch sehr anspruchsvoll und schwer lange aufrecht zu erhalten: ständiger Nachschub ist nötig und die angemessene Verteilung der Substanzen in der Stratosphäre nicht einfach (Verklumpung, kontraproduktiv bei falscher Konzentration, richtige Partikelgröße ist entscheidend).

## Marine Sky Brightening (MSB) – SRM

Verdichtung bzw. Schaffung reflektierender tiefer Wolkenschichten durch Manipulation derselben: am ehesten per Seesalz bzw. Salzwasserinjektion von autonomen Spezialschiffen denkbar. Probleme: richtige Tröpfengröße in den Wolken ist nötig, am Effektivsten an den Weströndern der Kontinente unweit des Äquators, was sehr ungleiche Strahlungsbedingungen heraufbeschwört und die natürlichen Windströmungen massiv beeinflusst, herabregnendes Salz(-wasser) kann Pflanzen schädigen. Die Physik in diesen Prozessen ist auch noch nicht ausreichend im Detail verstanden; Beobachtungen bei Schiffsemissionen legen nahe, dass dadurch auch der Himmel anbei der Wolken heller wird (Bezeichnung).

## Andere Methoden: Sonnenlicht wegspiegeln? (SRM)

Spiegel auf Landfläche: immense Flächennutzungskonflikte wegen hohem Flächenbedarf, dito auf Ozean zu starke Abschattung.

Lösung: in den Weltraum verlegen? Hat diverse Probleme:

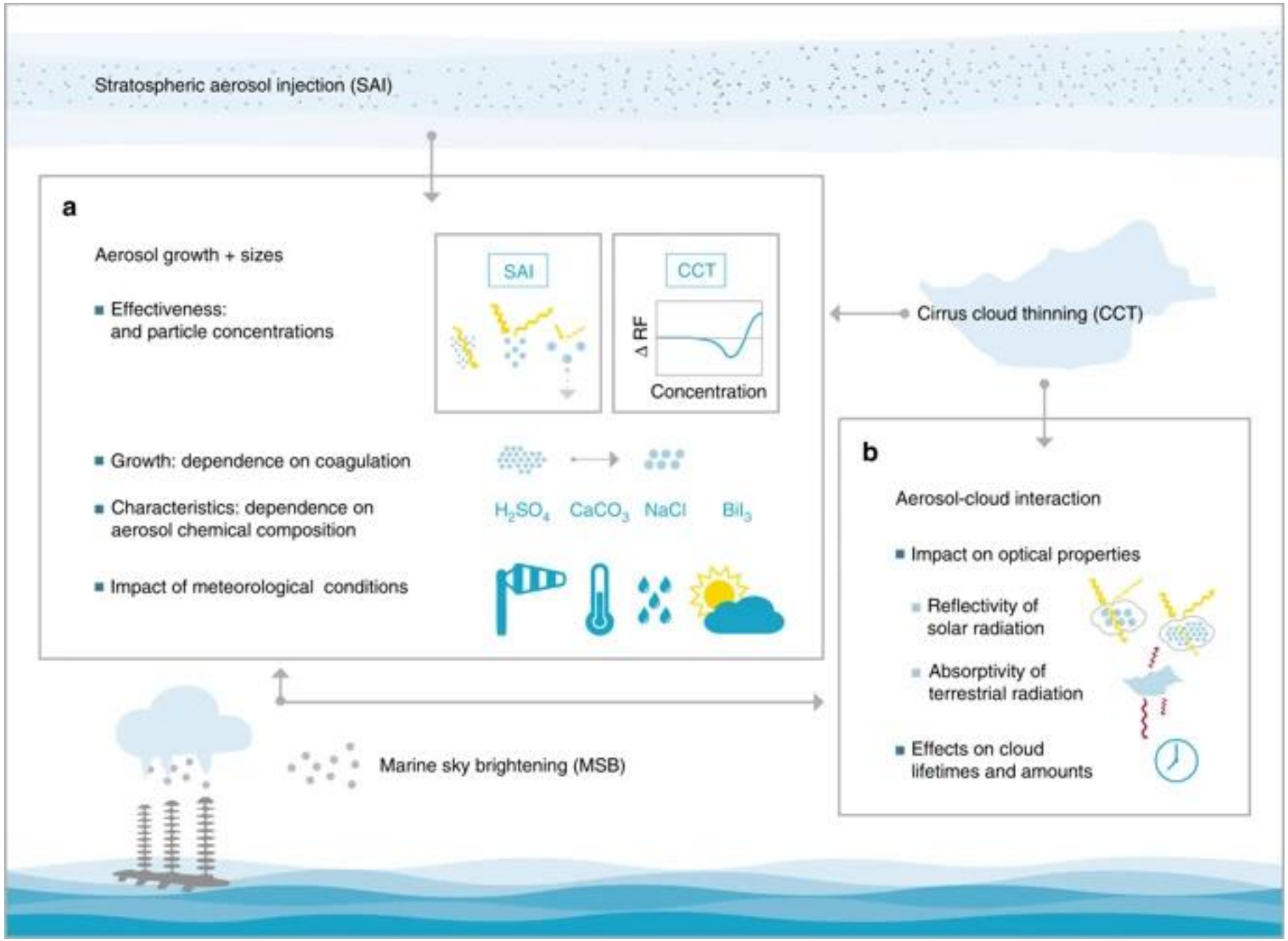
- Zu aufwändig mit Raketen in den Weltraum zu bringen – aber Weltraumaufzüge sind (noch?) nicht absehbar möglich.
- Gefahr sehr ungleicher Reflexion mit der Breite; schwierig, in höheren Breiten einzusetzen (Umlaufbahnen!).
- Hohe Kollisionsgefahr mit Weltraumschrott, sogar Kettenreaktion bei Kollisionen im Orbit leicht möglich.
- Müssen lange im Einsatz bleiben bzw. gewartet werden, um Rückschlag zu verhindern.

## Resümee SRM (Solar Radiation Management)

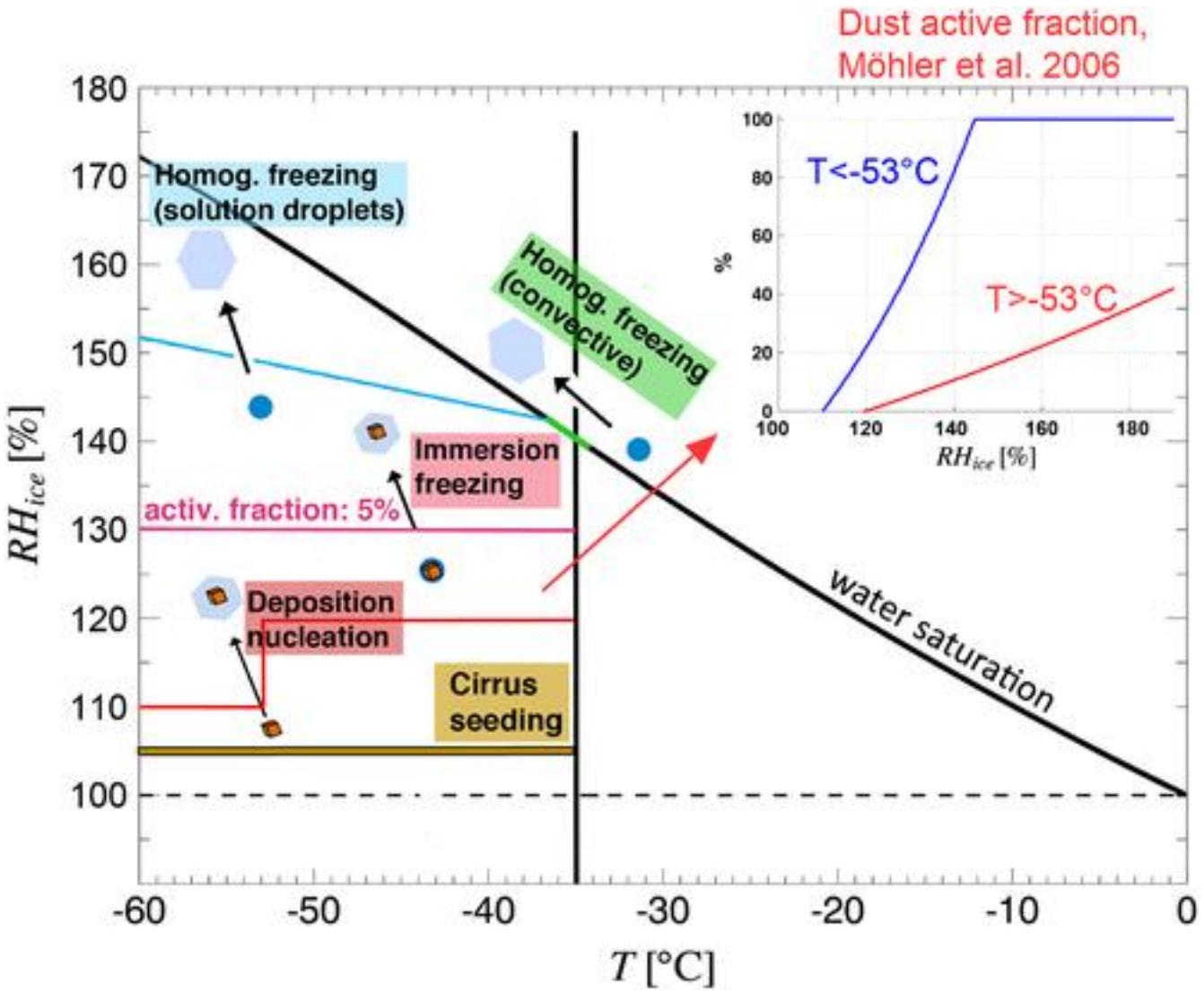
Dieser Ansatz ist alles andere als vielversprechend, die Einsatzmöglichkeit nicht absehbar, zu viele ungeklärte Risiken sind damit verbunden. Trotz der potenziell relativ raschen Wirkung ist das derzeit und möglicherweise dauerhaft keine Option.

## Was wäre wenn: stattdessen Infrarotstrahlung besser passieren lassen?

Diese Idee klingt verlockend und verspricht Vorteile, sozusagen die steigenden THG Konzentration direkt zu kompensieren…


Stratospheric aerosol injection (SAI)
a
Aerosol growth + sizes
Effectiveness:
and particle concentrations
SAI
CCT
ΔRF
Concentration
Growth: dependence on coagulation
Characteristics: dependence on
aerosol chemical composition
$H_2SO_4$ $CaCO_3$ NaCl $BiI_3$
Impact of meteorological conditions
Cirrus cloud thinning (CCT)
b
Aerosol-cloud interaction
Impact on optical properties
Reflectivity of
solar radiation
Absorptivity of
terrestrial radiation
Effects on cloud
lifetimes and amounts
Marine sky brightening (MSB)

# Mein Lieblingsverfahren: Cirrus Cloud Thinning (Seeding) – und warum es nicht geht




Zirruswolken in größeren Höhen (5 bis 18 km bei Temperaturen unter -38 Grad Celsius) reflektieren wenig Sonnenlicht, absorbieren aber viel Infrarotlicht und heizen wie THG den Planeten auf.

Interessanterweise wirkt ihr Abbau/ihre Verdünnung auch der Verringerung von Niederschlägen entgegen.

Aber: um dies zu bewerkstelligen, müssen die Wolken geimpft werden, am besten mit toxischem $BiI_3$ (Wismuttrijodid) und die wolkenbildenden Kristallisationskeime verkleinert werden. Das Impfmaterial muss ständig nachgeliefert werden…

Dieses Verfahren ist nicht effektiv genug, um global ausreichende Kühlwirkung zu erzielen!

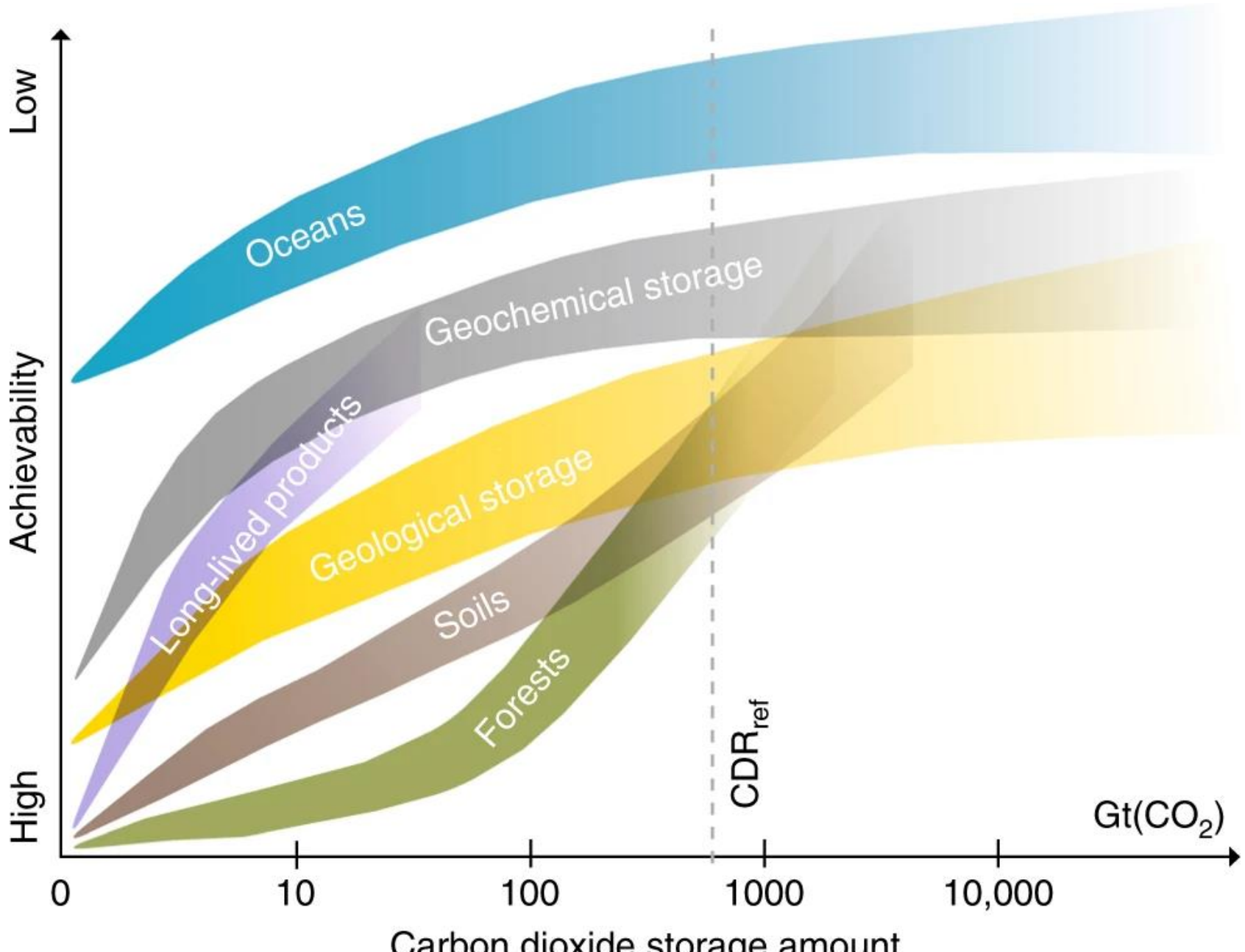
Am deutlichsten ist der Effekt noch in der Arktis, aber Plankton, Krill usw. im Lebensraum wären gefährdet.

# Zwei Vorschläge, die durch die Medien gingen

1. (Riesen-)Schneekanonen in die (West-)Antartiks: Prof. Levermann vom PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) schlug vor, mehrere zehntausend 200m-Windräder zu installieren, um damit Meerwasserentsalzungsanlagen zu betreiben und das entsalzene Wasser mit industriellen Schneekanonen auf die rasch schmelzenden westantarktischen Gletscher (v.a Thwaites und Pine Island) zu sprühen, um sie durch Schneenachschub zu stabilisieren. Weil das PIK bekanntermaßen Geoengineering, vorsichtig formuliert, für wenig aussichtsreich hält, wunderte ich mich natürlich über diesen Vorschlag: wohin mit den vielen Windrädern? Auf fließende Gletscher oder in den Teil des Ozeans, wohin die Gletscher Eisberge kalben? Des Rätsels Lösung: später verriet Prof. Rahmstorf, dass sein Kollege nur die praktische Unmöglichkeit solcher Ansätze demonstrieren wollte.
2. Antarktis einmauern: das brachte Prof. Lesch als Vorschlag im Fernsehen, um den Zustrom immer mehr warmen Wassers in den Bereich der Antarktis zu unterbinden (kommt zustande durch die Schwächung des Golfstromsystems (AMOC, thermohaline Zirlkulation, das weniger Wärme nach Europa transportiert, mehr verbleibt u.a. im Südatlantik) und so die Abschmelzung derselben zu bremsen. Es ist ein gigantisches Bauprojekt in einer sehr schwierigen Zone (Antarktis und umgebender Teil des Ozeans) und kann zudem den Zustrom immer mehr warmer Luft über die Mauer hinweg nicht verhindern. Ähnlich wie Levermanns Vorschlag erscheint das bei Licht betrachtet eher aussichtslos.

Was können wir also tun? Wenden wir uns jetzt Verfahren zu, die den Hauptübeltäter Kohlenstoffdioxid direkt aus der Atmosphäre entfernen können, zunächst technisch/geologisch, aber auch biologisch.

# Carbon Dioxide Removal (CDR)




Ohne wirksames RFG bleibt nur die direkte Entfernung von $CO_2$ aus der Atmosphäre.

$CDR_{ref}$ bedeutet die geschätzte Höhe der nötigen Entnahme aus der Atmosphäre, daran ist ablesbar, ob ein Bereich überhaupt genügend Potenzial hat.

Zudem sind die verschiedenen potenziellen Reservoirs unterschiedlich zugänglich.

Z.B. nimmt der Ozean ohnehin schon einen Teil unserer Emissionen auf, versauert dabei aber in gefährlicher Weise und nähert sich langsam der Sättigung.

# Peter Kalmus‘ (NASA) Lieblingsmethode: Olivin zerstäuben

Olivin gehört zu den Gesteinen, die auf lange Sicht $CO_2$ chemisch binden. Dieser Prozess ließe sich via Oberflächenvergrößerung, d.h. Zerstäuben des Gesteinsmaterials prinzipiell erheblich beschleunigen (Geochemie).

Probleme:

- Großer Energieaufwand für die Pulverisierung des Gesteins und ebenso für den Transport auf geeignete Flächen (Äcker?!)
- Vom Winde verweht: wie verhindert man, dass es dadurch unerwünscht umverteilt wird? (Verklumpung, Wegspülen…)
- Fehlende Technik- und Umweltfolgenabschätzung: in Staubform kann es ganz andere Eigenschaften haben als das Gestein

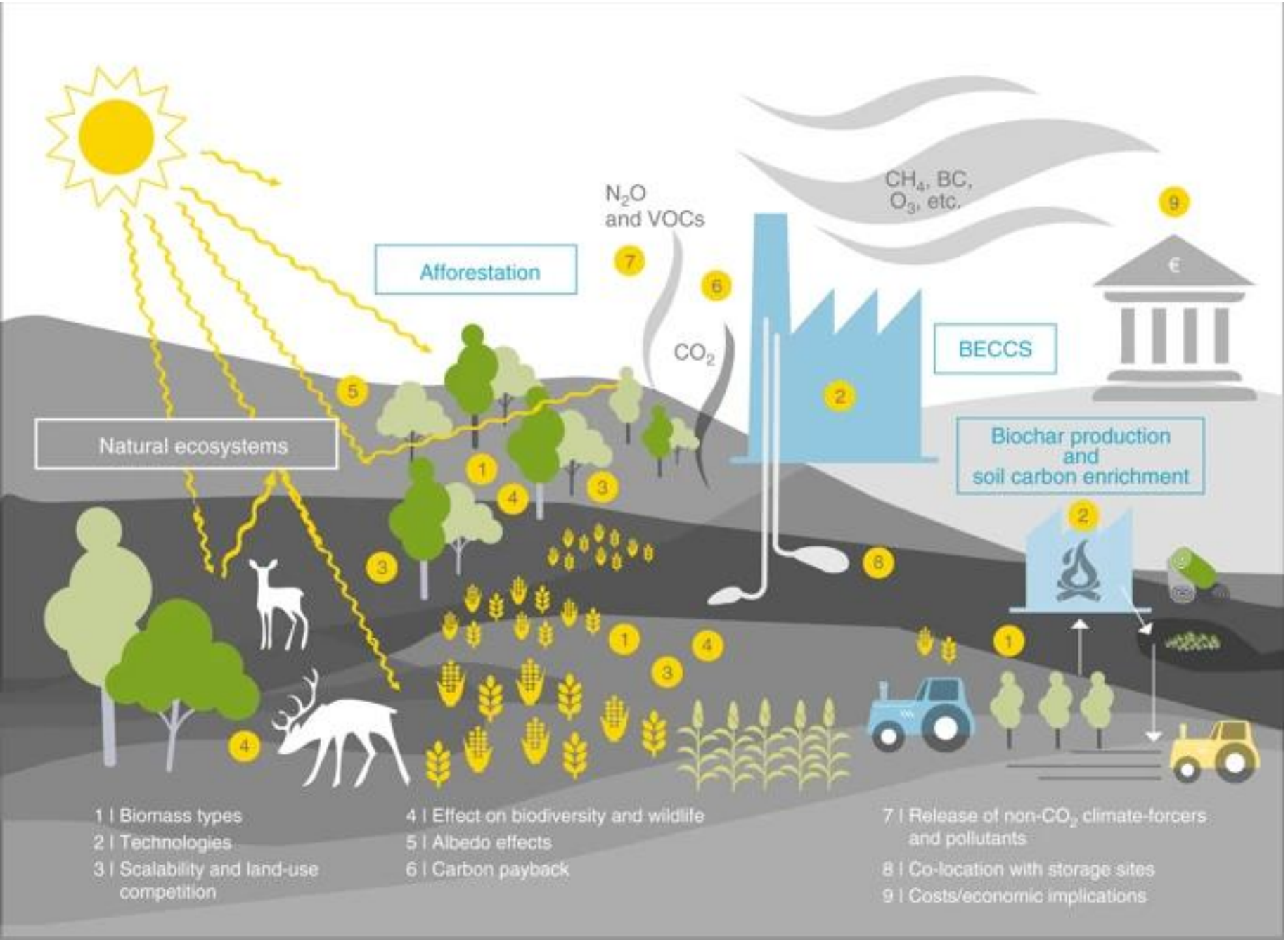
Fazit: obwohl das nicht undenkbar ist, fehlt noch so ziemlich alles für die praktische Durchführung.

# DACCS: Direct Access Carbon Capture and Storage

Neben SAI (s. RFG/SRM) ist dies ein Klassiker unter den Vorschlägen zum Geoengineering. Probleme:

- Die direkte Entnahme des Spurengases (400 ppm sind 0,04%) aus der Atmosphäre ist extrem energieaufwändig, worüber Pilotanlagen z.B. auf Island (umfangreiche supergünstige Geothermie) oder in kleinem Maßstab (PV) oft hinwegtäuschen
- Wohin damit: zwar erbot sich z.B. Norwegen $CO_2$ in die leeren Kammern ihres früheren Erdgases einzuleiten (was funktionieren würde), aber generell ist die Speicherung solcher Mengen des Gases problematisch, s. CCS Projekte (Dichtigkeit, Gefahr von Erdbeben usw.)

# Biologische Ansätze der Kohlenstoffspeicherung




Begrenzte nutzbare Landmasse der Erde: immer im Spiel ist Flächenkonkurrenz (land-use competition), mit allen denkbaren (anderen, wie Landwirtschaft und natürlichen Lebensräumen) Zwecken.

Einzige Ausname: OIF (Ocean Iron Fertilization), d.h. Eisendüngung. V.a. der südliche Teil des Ozeans ist durch Eisenmangel begrenzt, was das Wachstum des Phytoplanktons angeht. Probleme: unabsehbare Folgen für Ökosysteme (z.B. Algenblütengefahr) und die tatsächliche Kapazität des Ansatzes ist nicht zwingend ausreichend.

## Stoppen der Abholzung und (Wieder-)aufforstung

- Vorbedingung: quasi-Stopp der Abholzung weltweit
- Massive Flächenkonkurrenz begrenzt das Potenzial (z.B. durch landwirtschaftliche Flächen)
- Eigentliche $CO_2$ Einlagerung geschieht i.W. in der anfänglichen Wachstumsphase des Waldes in einigen Jahrzehnten (Latenz)
- Wald muss i.W. unangetastet bleiben, außerdem: Urwald oder (auch) Holzlieferant (Speicherung!)?
- Risiken durch rasche Klimaänderung: angepflanzte Baumarten müssen das über einen wesentlichen Teil ihrer Lebensdauer aus- und durchhalten können
- Wie bei den meisten anderen Vorschlägen gilt hier: die Notwendigkeit besteht, den Fleischkonsum weltweit massiv zu senken, um sowohl nötige Flächen für Wälder als auch weitere Lebensräume für die bedrohten Arten auf den nutzbaren Landflächen zu gewinnen bzw. zu erhalten!

## Jatropha-Anpflanzung in einigen Wüsten

Ähnlich vorigem Punkt: es sind spezialisierte Wüstenpflanzen ähnlich robust wie Kakteen, die ölhaltige Früchte produzieren.

- Einige Wüsten auf der Erde (aber: Atacama zu trocken!) eignen sich dafür, das vermeidet Flächenkonkurrenz (s.a. Branch & Wulfmeyer 2019)
- Führt zu verbessertem Wasserkreislauf bei Anbau auch in der Wüstenumgebung, Analyse vorher ist aber zwingend.
- Wahlweise kann die Bepflanzung (ca. 1 Milliarde ha weltweites Potenzial) zur Kohlenstoffdioxid-Bindung genutzt oder auch für die Produktion nachhaltigen und konfliktfreien Biosprits dienen (z.B. für Schiffe und Flugzeuge), der Flächenertrag ist jedoch begrenzt und der Anbau strikt auf sonst unfruchtbare Flächen zu begrenzen
- Wie bei Bewaldung sinkt durch die Anpflanzung die Albedo, d.h. insgesamt wird mehr Sonnenlicht absorbiert.

Jatropha Curcas (Purgiernuss, eine Brechnuss, Wolfsmilchgewächs) wie im erwähnten Artikel mit (ungenießbaren) Früchten, wird derzeit v.a. in Israel in Wüsten bereits angepflanzt (Bild R. K. Henning www.jatropha.org, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic)

## Erhalt und Renaturierung von Mooren und anderen Feuchtgebieten

- Sind starke natürliche Kohlenstoffspeicher
- Massiver Landnutzungskonflikt mit oft durch ihre Trockenlegung gewonnenen landwirtschaftlichen Flächen
- Flächenmäßig begrenzt auf ausreichend feuchte Gegenden
- Risiko der Austrocknung durch die Klimaerhitzung (kann mit Baumpflanzungen verringert werden)
- Sehr wichtig für Erhalt der Artenvielfalt

## BECCS am Beispiel von Bio-Blockheizkraftwerken

- Kohlenstoffabscheidung bei Verbrennung führt hier zur Bindung desselben, nicht nur klimaneutral – Mengen begrenzt, da nur biologische Abfälle und sonst nicht verwertbare organische Materialien verfeuert werden dürfen
- Lagerung bleibt unklar, ist aber angesichts nicht zu großer Menge wohl möglich (s. DACCS/Norwegen)

Andere Möglichkeiten könnten mehr bringen…

# Pflanzenkohle = Terra Preta = Biochar

Kann mit etwas Energieeinsatz unter Sauerstoffausschluss pyrolytisch gewonnen werden.

- verbessert ähnlich Dünger die Bodenqualität
- Führt zu Humusaufbau
- Bleibt als Kohlenstoff im Boden für lange Zeit -> Kohlenstoffspeicherung!
- Aber: Mengenrelevanz ist umstritten und wahrscheinlich begrenzter, als Optimisten meinen (der Name Terra Preta stammt aus Brasilien, wo die armen, oft durch Rodung von tropischem Regenwald gewonnenen Böden damit aufgewertet werden)
- Einziges auf drawdown (s.u.) als solches aufgeführtes Geoengineering-Verfahren!
- Bild: K.salo.85 / CC BY-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0)

# Zwischenfazit biologisch basiertes Geoengineering

- Einziger derzeit zweifellos machbarer und i.W. unschädlicher Ansatz
- Gesamteffekt überschaubar v.a. durch Flächenkonkurrenz, erfordert für Wirksamkeit starke Reduktion des Fleischkonsums
- Es ist nicht möglich, einem weiter-so mit fossilen Brennstoffen zu begegnen und nur ein Teil des schon vorhandenen Kohlenstoffdioxid-Überschusses kann damit abgebaut werden

# Das klingt nicht vielversprechend – was können wir tun?

Das Drawdown-Projekt listet 100 Verfahren auf, um die $CO_2$ Emissionen zu senken bzw. effektiv Kohlenstoffdioxid aus der Erdatmosphäre zu entfernen nach Potenzial und mit Angabe der Kosten.

Die Strategie beruht nicht wesentlich auf erfolgreichem Geoengineering: die Emissionen sollen soweit gesenkt und natürliche Senken unseres Planeten soweit unterstützt und gestärkt werden, dass sie langsam unseren Überschuss in der Atmosphäre abbauen können. Das ist ehrgeizig, aber möglich.

Die Energy Watchgroup hat eine Projektstudie veröffentlicht, die inklusive großflächiger Meerwasserentsalzung und Süßwasserverteilung (vgl. Aquädukte Roms) nur mit erneuerbaren eine mögliche klimaneutrale Weltwirtschaft beschreibt.

Ein überraschendes Beispiel aus drawdown (top ten!): silvopasture oder Hütewald (bessere Bezeichnung: Waldweide), um in lockeren Waldgebieten z.B. Kühe grasen zu lassen, durch natürliche „Abgasreinigung“ wird die Methanemission derselben auf ein Fünftel des heute üblichen auf Weideflächen reduziert! Das ist natürlich extensive Biolandwirtschaft mit relativ geringem Ertrag (niedrige Anzahl von Vieh pro Fläche).

## Fazit

Naive Geoengineering-Ansätze werden uns nicht vor der Klimakatastrophe bewahren und können nur ein wenig zum Abbau des zu hohen Kohendioxid-Gehalts der Atmosphäre beitragen, nachdem wir die Zivilisation auf eine klimaneutrale Grundlage gestellt haben. Es erfordert große Anstrengungen, das Erdsystem in die planetaren Grenzen zurückzuführen, die Mittel sind bekannt (dauerhaft < 350 ppm Kohlenstoffdioxid, allenfalls sehr kurzzeitig sind 450 ppm möglich, aktuell ca. 417 ppm).

**Literatur/Quellen:**


Hansen et al. 2008 planetare $CO_2$ Grenzen: https://openatmosphericsciencejournal.com/VOLUME/2/PAGE/217/

IPCC Sonderbericht 1,5 Grad Celsius und Landnutzung/-sytem usw.: https://www.de-ipcc.de/128.php

„Der Klimawandel“ Rahmstorf, Schellnhuber, C.H.Beck Verlag, ca. 10 Euro, broschiert

Mark Lawrence et al. 2018, Geoengineering: https://www.nature.com/articles/s41467-018-05938-3 (die meisten Abbildungen sind aus diesem Artikel, s.a. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Cirrus Cloud Thinning nicht ausreichend: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2015JD024666 von Blaž Gasparini & Ulrike Lohmann

Olivin-Verwitterung: Peter Köhler et al. (AWI) https://www.pnas.org/content/107/47/20228

Oliver Branch & Volker Wulfmeyer (Uni Hohenheim): Bepflanzung von Wüsten und Wasserhaushalt am Beispiel von Jatropha-Pflanzen https://www.pnas.org/content/pnas/116/38/18841.full.pdf

Drawdown-Projekt: https://www.drawdown.org
Energy Watch Group und ihr Projektplan für eine nachhaltige globale Zivilisation: http://energywatchgroup.org/

Gimmick: Wismut (209) ist radioaktiv, 2003 nachgewiesen (war vorhergesagt), aber mit 19 Trillionen Jahren (!) Halbwertszeit: https://www.nature.com/articles/nature01541