

N. MENGIS, U. BERNITT, A. OSCHLIES

9

Klima retten mit Kohlendioxid-Entnahme?

Saving the climate with carbon dioxide removal?

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die verschiedenen Methoden der Kohlendioxid-Entnahme (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) beschrieben, deren technologische Bereitstellung überprüft und Potenzial, Kosten und Nebenwirkungen anhand der neuesten Literatur diskutiert. Die Methoden werden darin unterschieden, ob sie Kohlenstoff durch chemische oder biologische Prozesse aus der Atmosphäre entnehmen, und ob sie diesen dann an Land, im Ozean oder in Gesteinsformationen speichern.

Summary

In this chapter different Carbon Dioxide Removal (CDR) methods are described. Based on the most recent literature, their respective tech-readiness, potential, cost and side-effects are discussed. The methods are distinct by their carbon uptake methodology, either through chemical or biological processes, as well as by the choice of storage location, either on land, in the ocean or in geological storage facilities.

1 Handlungsspielräume beim Klimawandel: Neue Lösungen gesucht

Ohne umfassende Maßnahmen zur Emissionsvermeidung wird sich das Klima der Erde bis zum Ende des 21. Jahrhunderts stark verändern. Nach allem, was wir heute wissen, wird ein solcher Klimawandel die Armut und Ungerechtigkeit auf der Erde verstärken und die Menschheit insgesamt verletzlicher machen (IPCC 2022). Um Risiken für die Gesellschaft zu minimieren, hat die Weltgemeinschaft zuletzt mit dem Klimaabkommen von Paris in 2015 beschlossen, den Temperaturanstieg auf maximal 2 °C zu begrenzen und darüber hinaus zu versuchen, ihn auf 1,5 °C zu limitieren. Die Hoffnung, dieses Ziel tatsächlich erreichen zu können, beruht unter anderem auf dem optimistischsten Szenario des 5. Weltklimaberichts von 2013 sowie den Szenarien aus dem im Herbst 2018 veröffentlichten Sonderbericht zum 1,5-Grad-Ziel (IPCC 2018). In allen Szenarien des Berichts wird davon ausgegangen, dass weitreichende Maßnahmen zur Emissionsvermeidung schnell und weltweit umgesetzt werden und die Menschheit zu-

künftig außerdem in der Lage sein wird, Kohlendioxid (CO₂) in großem Maßstab aus der Erdatmosphäre zu entfernen und sicher zu speichern. Um den Klimawandel aufzuhalten, muss es gelingen, bis Mitte des 21. Jahrhunderts alle CO₂-Emissionen zu stoppen oder aber zu neutralisieren, sodass weltweit Netto-Null-Emissionen erreicht werden. Dabei gilt, je länger die Emissionsvermeidung aufgeschoben wird, desto mehr CO₂ muss aus der Atmosphäre entfernt werden, um die Klimaziele zu erreichen. Für Deutschland werden in ambitionierten Szenarien zwischen 32 und 60 Mt CO₂ pro Jahr an verbleibenden Emissionen angenommen (MENGIS et al. 2022), die kompensiert werden müssten, um Netto-Null zu erreichen.

Aber wie würde man überhaupt CO₂ aus der Erdatmosphäre entfernen und speichern? Wie groß ist das Potenzial und gibt es Nebenwirkungen? Mit Methoden zur CO₂-Entnahme (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) soll Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt und langfristig an Land, im Ozean oder in geologischen Gesteinsformationen gespeichert werden.

2 Die verschiedenen Kohlendioxid-Entnahme-Methoden

Schon seit mehr als 20 Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler weltweit mit verschiedenen Methoden der CO₂-Entnahme (*Carbon Dioxide Removal*, CDR). Einige wurden bereits im Labor oder in kleinen Experimenten getestet, viele sind bislang nur theoretische Ansätze. Aussagen über ihre Wirksamkeit beruhen derzeit vor allem auf Modellierungsergebnissen.

Auf den folgenden Seiten wird je eine Beispiel-Methode der CO₂-Entnahme vorgestellt, die entweder biologische oder chemische Prozesse nutzen, um Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entnehmen und an Land, im Ozean oder in geologischen Gesteinsformationen zu speichern. Für alle Methoden werden Potenzial und Nebenwirkungen abgeschätzt. Eine Übersicht dieser Methoden ist grafisch in Abbildung 9-1 dargestellt.

2.1 Aufforstung von Wäldern

Der Begriff „Aufforstung“ bezieht sich auf das Bewalden von Flächen, die in der jüngsten Vergangenheit (meist ein Richtwert von 50 Jahren) keine Wälder beherbergten, „Wiederaufforstung“ auf das Bewalden von kürzlich abgeholzten Flächen. Beim Prinzip der Aufforstung soll das biologische CO₂-Aufnahmepotenzial von Bäumen genutzt werden. Bäume lagern über die Photosynthese Kohlendioxid aus der Atmosphäre als Kohlenstoff in ihrem Holz ein. Je nach Lebensalter der Bäume bleibt der Kohlenstoff über mehrere Jahrhunderte in den Wäldern gespeichert. Das gilt allerdings nur, wenn diese Bäume nicht abgeholzt oder abgebrannt werden oder zum Beispiel durch Schädlingsbefall oder Dürre absterben. Außerdem benötigt die Kohlenstoffspeicherung durch Aufforstung Zeit und erreicht irgendwann einen Sättigungspunkt.

Aufforstungs- und Wiederaufforstungsmaßnahmen werden seit Menschengedenken angewendet und sind daher in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit geeigneter Landflächen jederzeit großskalig einsetzbar. Das erwartete globale Kohlendioxid-Entnahme-Potenzial durch Aufforstung Mitte dieses Jahrhunderts variiert zwischen 0,5 und 3,6 Gigatonnen Kohlendioxid (GtCO₂) pro Jahr. Die Effektivität und die Permanenz sind dabei von vielen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel der atmosphärischen CO₂-Konzentration, dem fortschreitenden Klimawandel oder der Wasserverfügbarkeit. Die Kosten solcher großskaligen Bewaldungsprojekte werden zwischen 18 US\$ bis maximal 100 US\$ pro entnommene Tonne CO₂ angegeben und sind hauptsächlich abhängig von lokalen Gegebenheiten und Annahmen über einen zukünftigen Preis für CO₂-Verschmutzung (FUSS et al. 2018). In Deutschland könnte man über Landnutzungsänderung von Ackerland zu Wald durch aktive Aussaat oder Pflanzung von Bäumen ca. 3,5 Mt CO₂ pro Jahr in Forst-Biomasse speichern (BORCHERS et al. 2022).

Abhängig von der Umsetzung kann großskalige Aufforstung biophysikalische, soziale und ökonomische Nebenwirkungen haben. Positive Nebenwirkungen können Verbesserungen von Bodenqualität, lokaler Wasserversorgung und Biodiversität beinhalten. Bei dem Einsatz von Düngern kann es als Nebenwirkung verstärkt zur Bildung des Treibhausgases Lachgas (N₂O) kommen. Eine gut untersuchte Nebenwirkung ist die Veränderung der lokalen Albedo, also das Vermögen der Erdoberfläche, Sonnenstrahlung ins Weltall zurückzuwerfen. Aufforstung in höheren Breiten wie beispielsweise in der Tundra, würde die Albedo verringern, das heißt die Erdoberfläche dunkler machen. Die heutige Tundra ist im Winter von Eis und Schnee bedeckt. Diese weiße Fläche reflektiert einen Großteil der Sonnenstrahlung von der Erde zurück ins All. Wälder hingegen erscheinen vor allem im Winter dunkler, wodurch sie mehr Sonnenstrahlung aufnehmen und sich entsprechend stärker erwärmen. Diese Verringerung der Albedo stünde also dem eigentlichen Ziel der Aufforstung der Tundra, das Aufheizen der Erde zu vermindern, entgegen.

Darüber hinaus ist das Potenzial von Aufforstung abhängig von der bereitgestellten Fläche: Großflächige Aufforstung steht in Konkurrenz mit anderen Landnutzungen wie der als Weideland, Ackerland oder Naturschutzgebiet. Dabei wird sich die Konkurrenz um Landflächen mit der Zunahme der Weltbevölkerung generell verschärfen.

2.2 Eisendüngung des Ozeans

Eisendüngung im Ozean zielt auf eine Erhöhung der biologischen Produktivität in nährstoff-limitierten Regionen des Ozeans. Das pflanzliche Plankton im Meer wandelt durch Photosynthese im Meerwasser gelöstes CO₂ in Biomasse um, wodurch weiteres CO₂ aus der Atmosphäre in den Ozean nachströmen kann. In einem Viertel der Weltmeere herrscht ein natürlicher Mangel an Pflanzennährstoffen, insbesondere an Eisen (LAWRENCE et al. 2018). Hier würde die künstliche Eisendüngung bereits mit relativ kleinen Mengen das Planktonwachstum beachtlich ankurbeln und so die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre verstärken. Über die Nahrungskette gelangt ein Teil des gespeicherten Kohlenstoffs in weitere Meeresorganismen wie Kleinkrebse, Fische oder Wale, ein Teil sinkt als Kot oder abgestorbene Biomasse in die Tiefe. Letztlich wird praktisch die komplette Biomasse wieder von Bakterien verwertet, wobei das in den Lebewesen gespeicherte CO₂ wieder an das umgebende Wasser abgegeben wird und über die Ozeanzirkulation irgendwann wieder in Kontakt mit der Atmosphäre gelangt. Über die Zeitskalen dieses Kohlenstoff-Rückflusses gibt es große Unsicherheiten. Ein kleiner Teil der Biomasse sinkt in die Tiefsee, wo er ins Sediment am Meeresgrund eingelagert wird und somit der enthaltene Kohlenstoff der Atmosphäre für Jahrtausende entzogen ist. Modellrechnungen zeigen, dass nach Beendigung der Düngung höchstwahrscheinlich ein Großteil des vom Meer aufgenommenen Kohlendioxids auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten wieder in die Atmosphäre zurückkehren würde.

Durch Experimente im Labor und auf dem Meer konnte gezeigt werden, dass die Produktivität von Phytoplankton nach Zugabe von eisenhaltigem Pulver tatsächlich stark wächst und die CO₂-Aufnahme zunimmt. Das globale langfristige Potenzial dieser Maßnahme wird auf bis zu 2 GtCO₂ pro Jahr geschätzt, dafür müsste allerdings der gesamte Südliche Ozean permanent mit Eisen gedüngt werden. Die Kostenschätzungen einer solchen großskaligen Düngung des Ozeanes mit Eisenpulver sind mit 8 – 460 US\$ pro entnommene Tonne CO₂ sehr unsicher, und hauptsächlich abhängig von den Methoden, mit denen das Eisen wahrscheinlich in Form von Eisensulfat produziert und ausgebracht würde.

Inzwischen nehmen viele Wissenschaftler Abstand von der Idee der Eisendüngung als CO₂-Entnahme-Maßnahme, weil die Nebenwirkungen der Eisendüngung auf existierende Ökosysteme im Meer kaum abzusehen sind. So könnte es in den Ozeanen zu Effekten kommen, die man heute aus küstennahen, nährstoff-überdüngten Meeresgebieten kennt (LÖSCHKE und SCHRÖDER 2019). Durch das Zuviel an Nährstoffen könnte es nach starken Planktonblüten und deren sauerstoffzehrenden bakteriellen Ab-

bau zu sauerstoffarmen oder gar -freien Gebieten kommen. Ebenso wie an Land führt die Düngung zur verstärkten Lachgasproduktion, ein starkes Treibhausgas, das aus dem Meer in die Atmosphäre aufsteigen kann.

2.3 Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS)

Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, BECCS) verbindet zwei Verfahren, um CO₂ zu entnehmen. Wie bei der Aufforstung wird der Atmosphäre Kohlenstoff durch Photosynthese entzogen. In diesem Fall durch die Kultivierung schnell wachsender Pflanzen, durch deren Verbrennung dann Energie gewonnen wird (Bioenergie). Pflanzen, die hierfür infrage kommen, sind unter anderem das Chinaschilf (*Miscanthus*), Pappeln, Weiden sowie Eukalyptusarten. Sie alle liefern in sehr kurzer Zeit viel Biomasse. Das im Verbrennungsprozess freigesetzte CO₂ wird anschließend gebunden, verdichtet und in geologischen Speicherstätten permanent gelagert (Kohlenstoffbindung und -speicherung, CCS). Im Folgenden konzentrieren wir uns auf die gesamte BECCS-Prozesskette.

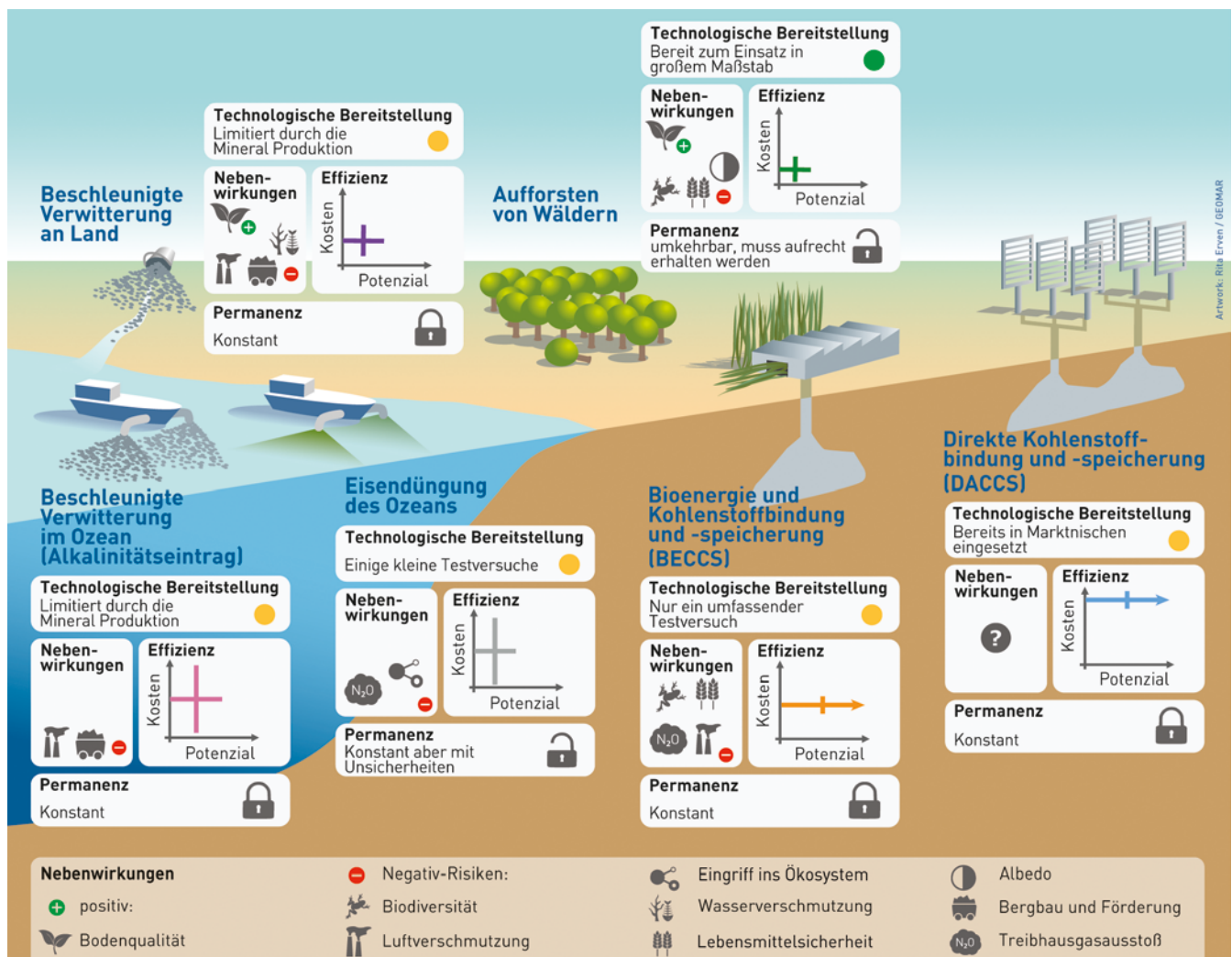


Abbildung 9-1: Übersicht über die einzelnen, in diesem Beitrag diskutierten Methoden zur CO₂-Entnahme und deren Parameter. Grafik-Konzept: Nadine Mengis/GEOMAR, Grafik-Design: Rita Erven/GEOMAR.

Der großskalige Anbau von Bioenergiepflanzen ist rein theoretisch möglich und auch die CCS-Technologie ist durch die wissenschaftliche Arbeit der letzten Jahre ausreichend erforscht und einsetzbar. BECCS spielt eine dominante Rolle in den Emissions-Szenarien des Weltklimarats zur Erreichung der Klimaziele. Aktuelle Energie-Szenarien gehen davon aus, dass BECCS im günstigsten Fall bis zu 20 % des weltweiten Energiebedarfs decken könnte (LÖSCHKE und SCHROEDER 2019), wobei die Schätzungen hier deutlich auseinandergehen. Würde man in den kommenden Jahren beginnen, die benötigte BECCS-Infrastruktur auszubauen, könnten damit ab Mitte des Jahrhunderts weltweit zwischen 2,4 und 11 GtCO₂ pro Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden. In Deutschland könnten wir mit verschiedenen Rohstoffquellen wie Holz, landwirtschaftlichen Rückständen, Kuhmist und Energiepflanzen für Bioenergieanlagen mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung bis zu 62 Mt CO₂ pro Jahr entnehmen (BORCHERS et al. 2022). Der größte limitierende Faktor hierbei ist die verfügbare Biomasse an Land. Als eine Alternative wird die Verwendung von Algen als BECCS-Rohstoff angedacht, wodurch sich der Landnutzungskonflikt zum Teil entschärfen ließe. Die Kosten für BECCS-Projekte werden zwischen 100 US\$ und 200 US\$ pro entnommene Tonne CO₂ angegeben, hauptsächlich abhängig von der Verfügbarkeit effizienter Biomasse, der angewandten Kohlenstoffbindungs-Technologie und der Länge der Transportwege. In den meisten Studien wird angenommen, dass der Biomasseanbau keine Emissionen verursacht, was in der Realität die Kohlenstoffminderung jedoch um ca. 20 % reduziert.

Um eine Kohlendioxid-Reduktion der oben erwähnten Größenordnung zu erreichen, wäre für den Anbau von Energiepflanzen eine Landfläche von rund einer bis vier Millionen Quadratkilometern nötig – was immerhin bis zu einem Drittel der heutigen weltweiten Ackerfläche entspricht. Der Anbau von Energiepflanzen steht damit genau wie die Aufforstung mit Blick auf Flächen-, Wasser- und Düngerbedarf in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Der verstärkte Düngereinsatz würde außerdem die Produktion von Lachgas erhöhen. Der Einsatz von BECCS ist auch davon abhängig, dass in diesem Ausmaß rechtzeitig geologische Speicherstätten erschlossen, Widerstände in Politik und Gesellschaft abgebaut und die entsprechenden juristischen Grundlagen gelegt werden.

Exkurs: Kohlenstoffspeicherung

Kohlenstoffbindung und -speicherung (*Carbon Capture and Storage, CCS*) bezeichnet den Prozess der Bindung von Kohlendioxid aus der Luft oder aus Verbrennungsgasen, der Aufreinigung und Verdichtung und letztendlich der Speicherung in Gesteinsformationen oder in ausgedienten Erdgas- bzw. Erdölfeldern. Ein Beispiel hierfür ist das Sleipner-Projekt im norwegischen Teil der Nordsee, bei dem Kohlendioxid, welches bei der Erdgasförderung extrahiert werden muss, in flüssiger Form in die sogenannte Utsira-Sandsteinformation gepresst wird. Im Untergrund

reagiert das Kohlendioxid mit dem Gestein und wird dadurch idealerweise langfristig chemisch neutralisiert und permanent gebunden. Ein Hauptrisiko sind dabei Störungen in den Gesteinsschichten, entweder natürlicher Art oder durch Bohrlöcher, durch die ein Teil des eingelagerten Kohlendioxids wieder an die Oberfläche und, bei Lagerstätten unter dem Meer, in das Meerwasser gelangen könnte.

Um zu prüfen, inwieweit CCS in der Praxis funktioniert und welche Risiken damit verbunden sind, wurden bislang weltweit rund 20 CCS-Forschungsprojekte durchgeführt. Teilweise entstanden sehr große CCS-Pilotanlagen, von denen einige bereits seit mehr als zwanzig Jahren in Betrieb sind. Grundsätzlich ist die CCS-Technologie durch die wissenschaftliche Arbeit der letzten Jahre ausreichend erforscht und einsetzbar. Dennoch ist die Speicherung von Kohlendioxid im Boden umstritten und die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie unklar. Ein Einsatz in vielen Staaten ist nur dann denkbar, wenn Chancen und Risiken durch weitere Forschung für jeden Standort genau analysiert werden. Eine solche Prüfung des Untergrunds und die Auswahl geeigneter Speicherstätten dauert typischerweise mindestens zehn Jahre; weitere fünf Jahre werden benötigt, um eine spezifische Anlage zu bewerten und die notwendigen Genehmigungen zu bekommen.

Berechnungen des globalen Kohlenstoffspeicher-Potenzials im Untergrund gehen weit auseinander. Die konservativsten Berechnungen geben ein Potenzial von 320 GtCO₂ an, wobei angenommen wird, dass nur 1 % aller Sedimentbecken für eine Lagerung in Frage kommt. Sobald sämtliche globale Lagerstätten, einschließlich ausgedienter und noch nicht erschlossener Erdgas- und Erdöllagerstätten, sowie Lagerstätten ohne geologische Schichtung betrachtet werden, welche auf anderen Mechanismen beruhen das CO₂ im Untergrund einzuschließen, steigt das Speicherpotenzial enorm auf bis zu 50.000 GtCO₂. Die *International Energy Agency* (IEA) gibt ein Lager-Potenzial von bis zu 10.000 GtCO₂ an.

2.4 Beschleunigte Verwitterung an Land

Verwitterung beschreibt den natürlichen Prozess der Gesteinszersetzung ausgelöst durch chemische oder physikalische Mechanismen, welche unter anderem von Temperatur, Oberfläche und Interaktion mit der Biologie abhängt. Bei dem Prozess reagieren insbesondere kalk- und silikathaltige Mineralien mit Kohlendioxid, wobei CO₂ aus der Luft entfernt und in (Bi-)Karbonat-Ionen umgewandelt wird. Dies stellt eine permanente Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre dar. Die chemische Reaktion läuft an der Gesteinsoberfläche ab und nimmt daher mit der Größe der Oberfläche zu. Bei der beschleunigten Verwitterung an Land soll dieser Prozess von geologischen auf menschlich relevante Zeitskalen gebracht werden, indem die Oberfläche der Gesteine durch Kleinmahlen möglichst stark vergrößert wird. Gezielt auf bereits tief verwitterten und verarmten, sauren Ackerböden ausgebrachte Karbonat- und Silikat-Gesteinspulver können so zu einer permanenten Senke von atmosphärischem CO₂ werden.

Die Düngung von Äckern mit Gesteinspulver ist ein lange praktiziertes Verfahren und wird in manchen Regionen bereits in großem Maßstab angewendet. Beispielsweise wird auf Zuckerrohrplantagen in Brasilien und auf der Insel La Réunion seit den 1960er-Jahren Basalt-Mehl eingesetzt. Mit kleinen Feldexperimenten wird die beschleunigte Verwitterung unter anderem in den USA, Malaysia und Brasilien untersucht, auch mit dem Ziel, ausgelaugte Böden zu verbessern. Berechnungen zum Potenzial dieser Methode wurden unter anderem für das vulkanische Silikat-Gestein Basalt durchgeführt. Abschätzungen zeigen, dass 3 Gt ausgebrachtes Basalt-Pulver pro Jahr weltweit rund 1 GtCO₂ binden könnte. Insgesamt wird das Potenzial zur Bindung von Kohlendioxid auf 2 bis 4 GtCO₂ pro Jahr geschätzt, abhängig von der genutzten Fläche und Gesteinsart. Noch nicht abgeschätzt wurde das zusätzliche Potenzial zur Bindung von Kohlendioxid, das sich durch das verbesserte Wachstum der Pflanzen aufgrund der in den Gesteinen enthaltenen Nährstoffe ergäbe. Um das weltweite Potenzial voll ausschöpfen zu können, müssten jährlich bis zu 12 Gt Gestein gewonnen, gemahlen und ausgebracht werden. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Menge jährlich abgebauter Kohle. Die berechneten Kosten für großskalige Ausbringung von Gesteinspulver variieren zwischen 50 US\$ und 200 US\$ pro entnommene Tonne CO₂, abhängig von den angenommenen Technologien für die Herstellung des Gesteinspulvers, dem Transport und der Herkunft des Materials (FUSS et al. 2018).

Der Vorteil der beschleunigten Verwitterung an Land ist, dass auf die bestehende Infrastruktur der Landwirtschaft aufgebaut werden könnte. Für eine Anwendung als CO₂-Entnahme-Methode müsste allerdings der derzeitige Abbau von Gesteinen um ein Vielfaches erhöht werden. Da die Anwendung von Karbonaten und Silikaten insbesondere in wirtschaftlich oft schwächeren Tropenregionen am effektivsten ist, wäre zu klären, wie die Kosten dieser Maßnahmen (zum Beispiel Abbau, Transport) gedeckt werden könnten. Als positiver Nebeneffekt würden sich die Bodeneigenschaften verarmter Böden verbessern und damit auch für die Nahrungsmittelproduktion verfügbar machen. Da verarmte Böden wie beispielsweise der Ferralsol in den niederschlagsreichen Tropengebieten vorkommen, ergäbe sich hier auch kein Problem mit der Bewässerung. Globale Abschätzungen zu den Auswirkungen der Methode sind derzeit noch sehr ungenau, da wichtige Parameter, wie zum Beispiel die Verwitterungsgeschwindigkeit oder auch mögliche Nebenwirkungen aufgrund von Verunreinigungen durch Schwermetalle im Gestein, ohne sorgfältige Experimente nicht geklärt werden können.

2.5 Beschleunigte Verwitterung im Ozean (Alkalinitätseintrag)

Bei der beschleunigten Verwitterung im Ozean wird Silikat- oder Karbonat-Gesteinsmehl nicht an Land ausgebracht, sondern direkt ins Oberflächenwasser des Ozeans eingetragen, wo die chemische Verwitterungsreaktion im Wasser gelöstes CO₂ analog zur Verwitterung an Land in

Form von Biokarbonat- und Karbonat-Ionen chemisch bindet. Dadurch wird das Wasser basischer und wirkt der Ozeanversauerung entgegen. Durch diesen Prozess kann mehr CO₂ aus der Atmosphäre in den Ozean nachströmen, was eine permanente Senke von atmosphärischem CO₂ darstellt.

Damit die beschleunigte Verwitterung einen globalen Effekt erreicht, müsste für die benötigte Menge an Mineralien ein Bergbau in großer Dimension etabliert bzw. eine große industrielle Fertigung aufgebaut werden. Diese Mineralien müssten abgebaut und zu einem feinen Pulver zermahlen oder in einem industriellen Prozess chemisch aufbereitet werden, damit sie sich schnell im Wasser auflösen und nicht in die Tiefe und damit weg vom direkten Kontakt mit der Atmosphäre absinken, bevor sie mit dem Kohlendioxid reagieren. Wird das Gesteinspulver in flachen Küstengewässern eingebracht, wäre auch auf den Boden gesunkenes Material für längere Zeiten in Kontakt mit dem Oberflächenwasser und damit der Atmosphäre. Vorausgesetzt man begänne umgehend damit, diese CO₂-Entnahme-Methode aufzubauen, könnten ab Mitte des Jahrhunderts bis zu 5 GtCO₂ pro Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden. Die Kosten werden auf 14 US\$ bis über 500 US\$ pro entnommene Tonne CO₂ geschätzt. In der Summe wäre diese CO₂-Entnahme-Maßnahme kostspielig, energieintensiv und auch an Land ein großer Eingriff.

Um die Nebeneffekte auf Meeresökosysteme besser abschätzen zu können, bräuchte es Daten aus größeren, räumlich begrenzten Feldexperimenten. Manche Gesteine enthalten Eisen, das im Meer als Dünger wirkt, oder möglicherweise giftig wirkende Verunreinigungen, was zu unbeabsichtigten Nebenwirkungen führen könnte.

2.6 Direkte Kohlenstoffbindung und -speicherung (DACCS)

Bei der direkten Kohlenstoffbindung und -speicherung (*Direct Air Carbon Capture and Storage*, DACCS) wird Umgebungsluft über großflächig ausgebrachte, chemische Bindemittel geleitet, die Kohlendioxid aus der Luft filtern. Um das abgetrennte Kohlendioxid der Atmosphäre langfristig zu entziehen, muss es zunächst verflüssigt und verdichtet werden, und kann dann ähnlich wie bei BECCS unterirdisch gespeichert werden. Anlagen zur CO₂-Abscheidung sind kommerziell erhältlich (zum Beispiel für U-Boote und Raumfähren, aber inzwischen auch für CO₂-Abscheidung aus der Umgebungsluft). Die Verfahren sind sehr energieaufwendig und nur dann sinnvoll, wenn sie mit regenerativen Energien betrieben werden.

Die verschiedenen Kohlenstoffbindungs-Verfahren kämpfen vor allem mit dem Problem der Energieeffizienz, aber auch mit der Aufgabe, eine möglichst große Kontaktfläche herzustellen. Da die Kohlendioxid-Konzentration in der Luft mit nur etwa 0,04 Prozent gering ist, müssten enorme Luftmengen gefiltert werden, wofür große, energie-intensive Anlagen benötigt werden. Außerdem hängt die Umsetz-

barkeit von DACCS davon ab, ob oder in welchem Maße CCS etabliert wird. Aktuell werden neben mehreren kleinen, drei größere DACCS-Pilotanlagen betrieben. Das dabei herausgefilterte CO_2 wird bisher entweder in die Nutzung (z. B. Gewächshäuser) gegeben (*Carbon Capture and Use, CCU*) und landet damit am Ende wieder in der Atmosphäre oder es wird verpresst und damit permanent aus der Atmosphäre entfernt. Mit DACCS könnte bei intensiver Weiterentwicklung der Technologie Kohlendioxid prinzipiell unbegrenzt aus der Atmosphäre entfernt werden. Stünden für das Betreiben von DAC-Anlagen 15 TWh (etwa 3 % der aktuellen innerdeutschen Stromproduktion) zur Verfügung, so könnten damit 16 Mt CO_2 pro Jahr bei Verfügbarkeit eines CO_2 -neutralen Strom-Mixes abgeschieden werden (LUDERER et al. 2021). Die angegebenen Kosten einer Tonne verflüssigten Kohlendioxids variieren sehr stark. Im Mittel werden sie auf 600 US\$ pro entnommene Tonne CO_2 geschätzt. *Climeworks* auf Island, die weltweit einzige *Direct Air Carbon Capture*-Anlage, die eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung beinhaltet, gibt Kosten von 1000 € pro Tonne CO_2 an (<https://climeworks.com>). In einem aktuellen Projekt in der kanadischen Provinz British Columbia wurde unlängst eine große Pilotanlage in Betrieb genommen, die einen Preis von rund 100 US\$ pro Tonne erreichen soll. Durch weitere technologische Fortschritte wird in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts mit einer Kostenreduktion bei steigender Effizienz gerechnet.

Bisher wurden in der Literatur noch keine umfassenden Nebeneffekte für diese CO_2 -Entnahme-Maßnahme diskutiert. Obwohl bei einem großskaligen Einsatz die physikalischen Dimensionen enorm wären, geht man davon aus, dass genügend Landflächen und Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen. Bei der Speicherung treten dieselben Risiken auf wie bei allen geologischen Kohlenstoffspeicherungen (siehe Exkurs: Kohlenstoffspeicherung).

3 Zusammenfassung

Schon die unvollständige Aufzählung verschiedener CO_2 -Entnahme-Methoden macht deutlich, dass es eine Fülle an Ideen gibt, die in der Zukunft potenziell als Ergänzung zur Emissionsminderung anwendbar wären. Während einige Methoden, wie etwa die Aufforstung, bereits technisch ausgereift sind, sind andere bloße Ideen. Als sicher gilt, dass man nicht nur auf eine einzige Methode setzen, sondern je

nach den Bedingungen vor Ort und je nach dem Zustand des Klimas eine Kombination verschiedener Methoden nutzen würde und müsste. Dabei ist zu beachten, dass viele Methoden der CO_2 -Entnahme über die Änderung der Albedo und des Wasserkreislaufs auch direkt in den Strahlungshaushalt eingreifen.

Beim Einsatz eines Portfolios von verschiedenen CO_2 -Entnahme-Maßnahmen käme hinzu, dass sich einzelne Methoden in ihren Wirkungen überlagern könnten. Die Situation wäre dann im Grunde vergleichbar mit einem Patienten, der zur Bekämpfung einer Krankheit viele verschiedene Medikamente einnimmt, von denen man aber weder genau weiß, wie sie individuell beim Patienten wirken noch wie sie es im Zusammenspiel mit anderen Medikamenten tun. Wie groß die Wechselwirkungen sind beziehungsweise wie man sie idealerweise nutzt, ist noch nicht ausreichend untersucht. Es könnte schwierig sein, Effektivität und Nebenwirkungen auf einzelne Methoden „herunterzubrechen“ und den Einsatz dementsprechend zu regulieren. Eine internationale Abstimmung über den Einsatz der Methoden und ein koordiniertes Vorgehen wäre daher eine grundlegende Voraussetzung.

Ob CO_2 -Entnahme-Maßnahmen als Ergänzung zur Emissionsminderung zum Einsatz kommen, wird letztlich von politischen Entscheidungen und gesellschaftlichen Werten abhängen. Der Einsatz ist eben nicht nur eine Frage der technischen Machbarkeit. Vielmehr werden auch grundlegende gesellschaftliche Fragen wie etwa die der Generationengerechtigkeit berührt.

Es gibt eine Vielzahl von technisch plausiblen Methoden, die nach bisherigem Wissen zumindest theoretisch das Potenzial haben, CO_2 in größerem Stil (d. h. Milliarden Tonnen pro Jahr) aus der Atmosphäre zu entfernen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist allerdings keine dieser Methoden im großen Maßstab einsetzbar. Das in der Praxis realisierbare Potenzial, die Nebenwirkungen und auch die Permanenz der Speicherung sind für die einzelnen Methoden im Allgemeinen noch nicht ausreichend bekannt. Auch sind die technischen Konzepte noch nicht ausgereift, beziehungsweise fehlen Strategien zur großflächigen Anwendung der Methoden sowie zu Genehmigungsverfahren, zur Überwachung und zum verantwortungsvollen Betrieb. In vielen Fällen gibt es wissenschaftliche, rechtliche, ethische oder politische Bedenken gegen Feldexperimente und gegen den Einsatz der Methoden.



TRICKFILM ÜBER CLIMATE ENGINEERING AUF YOUTUBE:

<https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/trickfilm.html>

Literatur

- BORCHERS, M., THRÄN, D., CHI, Y., et al., 2022: Scoping carbon dioxide removal options for Germany – What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? *Frontiers in Climate* **4**, doi: 10.3389/fclim.2022.810343.
- FUSS, S., LAMB, W.F., CALLAGHAN, M.W., et al., 2018: Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* **13**, doi: 10.1088/1748-9326/aabf9f.
- IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PÖRTNER, H.O., et al. (Hrsg.). *Cambridge University Press*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi: 10.1017/9781009157940.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. PÖRTNER, H.O., ROBERTS, D.C., TIGNOR, M., et al. (Hrsg.). *Cambridge University Press*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009325844.
- LAWRENCE, M.G., SCHÄFER, S., MURI, H., SCOTT, V., OSCHLIES, A., VAUGHAN, N.E., BOUCHER, O., SCHMIDT, H., HAYWOOD, J., SCHEFFRAN, J., 2018: Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications* **9**, doi: 10.1038/s41467-018-05938-3.
- LÖSCHKE, S., SCHRÖDER, T., Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689), 2019: Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte. URL: www.spp-climate-engineering.de/index.php/climateengineering_spp1689_brosch2fc1-2.pdf, Abruf: 12.10.2022.
- LUDERER, G., KOST, C., SÖRGEL, D. (Hrsg.), 2021: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich (Ariadne-Report). Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 359 S., doi: 10.48485/pik.2021.006.
- MENGIS, N., KALHORI, A., SIMON, S., et al., 2022: Net-zero CO₂ Germany — A retrospect from the year 2050. *Earth's Future* **10**, doi: 10.1029/2021EF002324.

Kontakt

DR. NADINE MENGIS
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Forschungseinheit Biogeochemische Modellierung
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
nmengis@geomar.de

M.A. ULRIKE BERNITT
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Forschungsbereich Marine Biogeochemie
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
ubernitt@geomar.de

PROF. DR. ANDREAS OSCHLIES
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Forschungseinheit Biogeochemische Modellierung
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
aoschlies@geomar.de