

# Kohlendioxid- entnahmeverfahren an Land

wie sie funktionieren und warum wir sie brauchen,  
um unsere Klimaziele zu erreichen

**Bei der Begrenzung des Klimawandels hat die Reduktion der Treibhausgasemissionen oberste Priorität. Um jedoch das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen, benötigen wir zusätzlich Verfahren, die der Atmosphäre dauerhaft Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entziehen. An Land stehen uns dafür biologische, chemische und geochemische Entnahmemethoden zur Verfügung. Bevor jedoch über ihren Einsatz entschieden werden kann, müssen Nutzen, Kosten und mögliche Risiken erforscht und anschließend gegeneinander abgewogen werden.**

#### DAS ZIEL: EINE TREIBHAUSGASNEUTRALE ZUKUNFT

Die wissenschaftlichen Beweise sind eindeutig: In allen Teilen der Welt schadet der Klimawandel uns Menschen und der Natur in einem immer drastischeren Ausmaß. Die Klimafolgen und -risiken sind mittlerweile so hoch, dass die Gesundheit des Planeten Erde auf dem Spiel steht und mit ihr das Wohlergehen aller Menschen. Fest steht auch: Begrenzen werden wir die von uns selbst verursachte Erderwärmung nur, wenn es gelingt, unsere menschengemachten Kohlendioxidemissionen auf eine rechnerische Null zu reduzieren. Noch ehrgeiziger ist das Ziel, zusätzlich den Ausstoß weiterer Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und fluorierter Treibhausgase, sogenannter F-Gase, zu minimieren. Dadurch würde der Klimawandel noch wirksamer bekämpft. Fachleute sprechen in dem Zusammenhang vom Ziel der Treibhausgasneutralität. Das bedeutet, dass nur so viele von Menschen verursachte Treibhausgase in die Atmosphäre entweichen dürfen, wie wir sie der Atmosphäre auch wieder entnehmen können.

Die Europäische Union will das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 erreichen. Damit will sie ihren Beitrag dazu leisten, dass die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius im Ver-

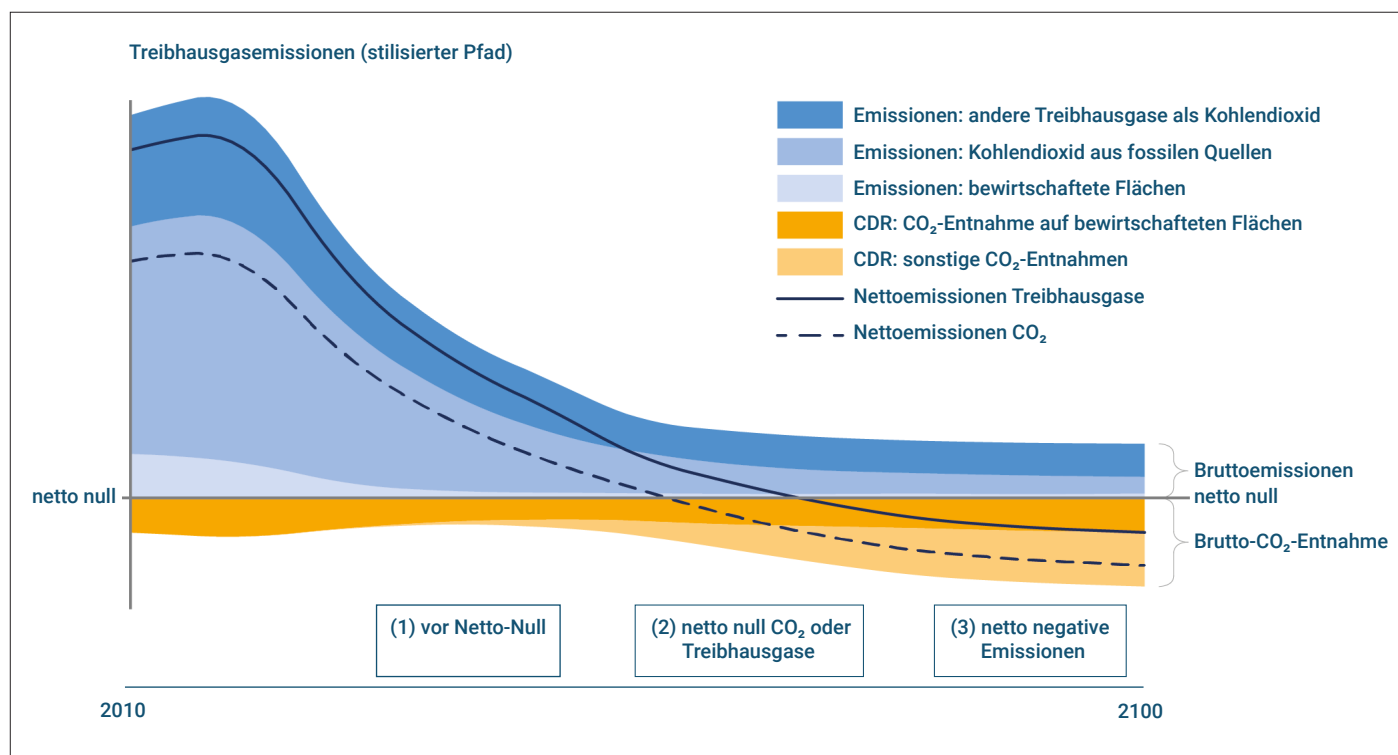
gleich zur vorindustriellen Zeit begrenzt wird. Deutschland hat sich dieses ehrgeizige Klimaziel bereits für das Jahr 2045 gesetzt und will im Anschluss dazu beitragen, dass „netto negative Emissionen“ erreicht werden, um auch einen Teil der historischen Emissionen zu kompensieren. „Netto negativ“ heißt, dass die Menschheit der Atmosphäre in der Summe mehr Treibhausgase – insbesondere Kohlendioxid – entnimmt, als sie durch eigene Aktivitäten in diese entlässt. Dadurch würde zunächst die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre sinken und wenig später auch die globale Durchschnittstemperatur.

#### KOHLENDIOXIDENTNAHME AUS DER ATMOSPÄRE: DRINGEND BENÖTIGT

Vom Menschen verursachte Treibhausgasemissionen entstehen durch die Förderung und das Verbrennen fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle, durch die Rodung von Wäldern, durch intensiven Ackerbau und Viehhaltung, durch Industrieprozesse sowie durch Zersetzungsprozesse auf Müllkippen und viele andere menschliche Aktivitäten. Bislang weiß niemand, wie die Menschheit diese Emissionen künftig vollständig auf ökologische und sozialverträgliche Weise vermeiden kann.

Vielmehr gehen Expert:innen davon aus, dass Deutschland auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Restmengen an CO<sub>2</sub>, vor allem aber an Methan und Lachgas, freisetzen wird. Die Höhe dieser sogenannten Restemissionen wird in einer aktuellen Studie mit optimistischen Szenarien auf mindestens 62 bis 130 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr für Deutschland geschätzt, das sind circa 5 bis 10 Prozent der Emissionen des Basisjahres 1990.

Was geschehen muss, um dieses Emissionsminimum zu erreichen, wird im Kasten auf Seite 4 erläutert.



Um die Ziele der Kohlendioxid- und Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen die von uns Menschen verursachten Treibhausgasemissionen drastisch reduziert werden. Gebraucht wird außerdem eine Kohlendioxidentnahme, um 1) die Nettoemissionen kurzfristig zu senken, 2) Restemissionen mittelfristig auszugleichen sowie 3) auf lange Sicht hin netto negative Emissionen zu erreichen. Letztere würden zu einem Absinken der globalen Mitteltemperatur führen. Grafik: IPCC, AR6 WGIII-Bericht, Kapitel 12.

## KOHLENDIOXIDÄQUIVALENTE

Um die Erwärmungswirkung freigesetzter Treibhausgase vergleichen zu können, werden Methan-, Lachgas- und andere Treibhausgasemissionen in jene Menge Kohlendioxid umgerechnet, die über einen bestimmten Zeitraum – meist werden 100 Jahre gewählt – dieselbe Erwärmungswirkung hervorrufen würde wie die freigesetzte Menge Methan oder Lachgas. Die errechnete Menge CO<sub>2</sub> wird als Kohlendioxid-äquivalent (CO<sub>2</sub>eq) bezeichnet.

## RESTEMISSIONEN MÜSSEN DURCH KOHLENDIOXID-ENTNAHME AUSGEGLICHEN WERDEN

Um Netto-null-Emissionen zu erreichen, müssen alle verbleibenden Restemissionen ausgeglichen werden. Das heißt, eine gleichwertige Menge CO<sub>2</sub>-Äquivalente muss der Atmosphäre entnommen und für einen möglichst langen Zeitraum sicher gespeichert werden.

Fachleute gehen aktuell davon aus, dass die Menschheit der Atmosphäre bis zum Jahr 2100 schätzungsweise 440 bis 1100 Milliarden Tonnen Kohlendioxid entnehmen muss, wenn sie ihre Restemissionen in jenem Umfang ausgleichen will, dass sie die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius begrenzt. Das ist das Ergebnis von Berechnungen mit 231 verschiedenen Klimaszenarien.

**Den Ausstoß von Treibhausgasen von vornherein zu vermeiden, schützt das Klima sicherer und für den größten Anteil an Emissionen auch günstiger, als der Atmosphäre freigesetztes Kohlendioxid im Nachhinein wieder zu entnehmen. Die Vermeidung von Treibhausgasemissionen muss deshalb oberstes Ziel aller Klimaschutzbemühungen sein.**

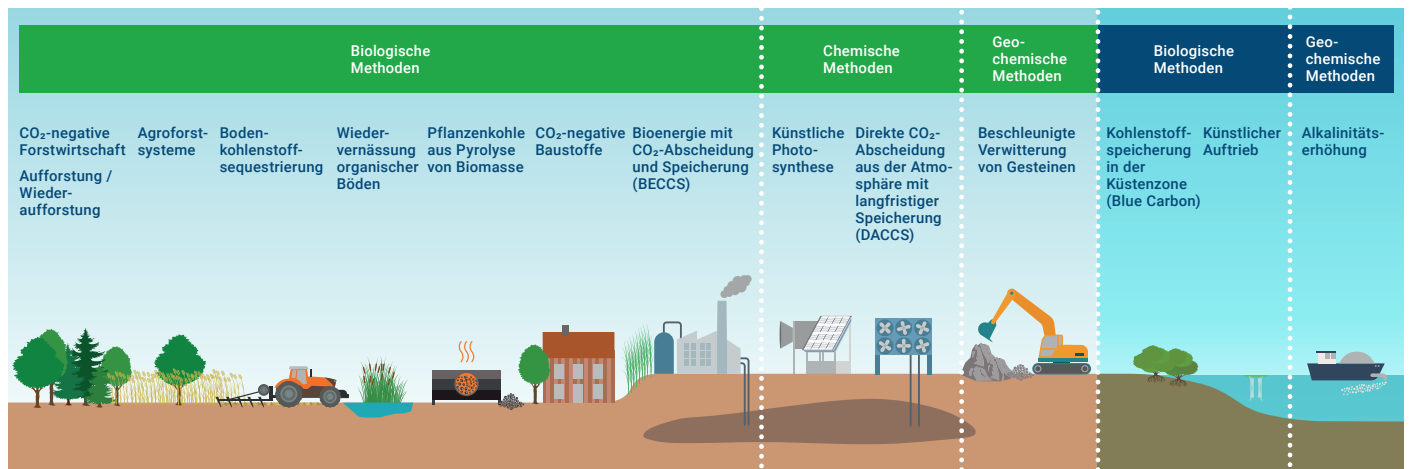
## EMISSIONSVERMEIDUNG MUSS KLAR VON CO<sub>2</sub>-ENTNAHME UNTERSCHIEDEN WERDEN

Um ein Entweichen von Kohlendioxid aus fossilen Quellen zu verhindern, wird das Treibhausgas an einigen Kraftwerken, Industrieanlagen und bei der Erdgasförderung aus dem Rauch- oder Abgasstrom abgeschieden, komprimiert und größtenteils in unterirdischen Gesteinsschichten eingelagert. Solche Ansätze werden als Kohlendioxidabscheidung und -speicherung bezeichnet (englisch: **Carbon Capture and Storage, CCS**).

Auch einige Verfahren zur Kohlendioxidentnahme nutzen am Ende ihrer Prozesskette Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -speicherung. Dennoch sind sie klar von den CCS-Verfahren zur Minderung fossiler Emissionen zu unterscheiden, weil das abgetrennte Treibhausgas zum Beispiel aus der Verbrennung pflanzlicher Biomasse stammt und somit vorher von Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde. Das ist bei bislang existierenden Anwendungen von CO<sub>2</sub>-Abscheidung kaum der Fall. Der überwiegende Teil des abgeschiedenen Kohlendioxids stammt derzeit aus der Öl- und Gasproduktion oder aber aus Industrieprozessen wie der Düngemittelproduktion oder Chemieindustrie. Seine Einlagerung verhindert eine weitere Erwärmung durch das einbehaltene Kohlendioxid, kann aber nicht für den Ausgleich von Restemissionen genutzt werden.

Aufgrund dieser Bilanzierungsvorschriften muss in der Klimapolitik ganz klar zwischen einer Emissionsvermeidung und einer tatsächlichen Kohlendioxidentnahme unterschieden werden: Als CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren (**Carbon Dioxide Removal, CDR**) dürfen nur jene Verfahren bezeichnet werden, bei denen das Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, seine anschließende Speicherung über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten und länger erfolgt und die Entnahme ein Resultat menschlichen Handelns ist und demzufolge zusätzlich zu den natürlichen CO<sub>2</sub>-Aufnahmeprozessen von Land und Ozean erfolgt ist.

Diese Voraussetzungen erfüllen eine Vielzahl von Verfahren, deren Funktionsweisen jedoch sehr verschieden sein können und die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden und daher noch nicht alle einsatzbereit sind. Fachleute unterscheiden biologische, chemische und geochemische CDR-Methoden.



Fachleute unterscheiden CDR-Verfahren anhand ihres zugrundeliegenden Entnahmeprozesses sowie hinsichtlich der Frage, für wie lange das Kohlendioxid anschließend gespeichert wird. Diese Grafik listet eine Vielzahl der bislang bekannten CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren – sowohl aus dem terrestrischen, als auch aus dem marinen Bereich. Grün unterlegt sind all jene, die im Forschungsprogramm CDRterra untersucht werden. Grafik: Björn Maier nach einer Vorlage aus IPCC, AR6 WGIII-Bericht, Kapitel 12.

# WIE WEIT KÖNNEN DIE DEUTSCHEN TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN REDUZIERT WERDEN?

Die Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen auf ein Minimum von 62 bis 130 Millionen Tonnen Kohlendioxid-äquivalente im Jahr 2045 ist an umfangreiche Bedingungen geknüpft. Dazu gehören:

- die **vollständige Vermeidung aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen** – das heißt, die vollständige Umstellung auf eine Energieversorgung bei Strom, Wärme und Transport aus erneuerbaren Quellen und
- die **vollständige Vermeidung aller Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft.**

Durch beide Maßnahmen ließen sich Deutschlands Restemissionen auf rund 130 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente reduzieren.

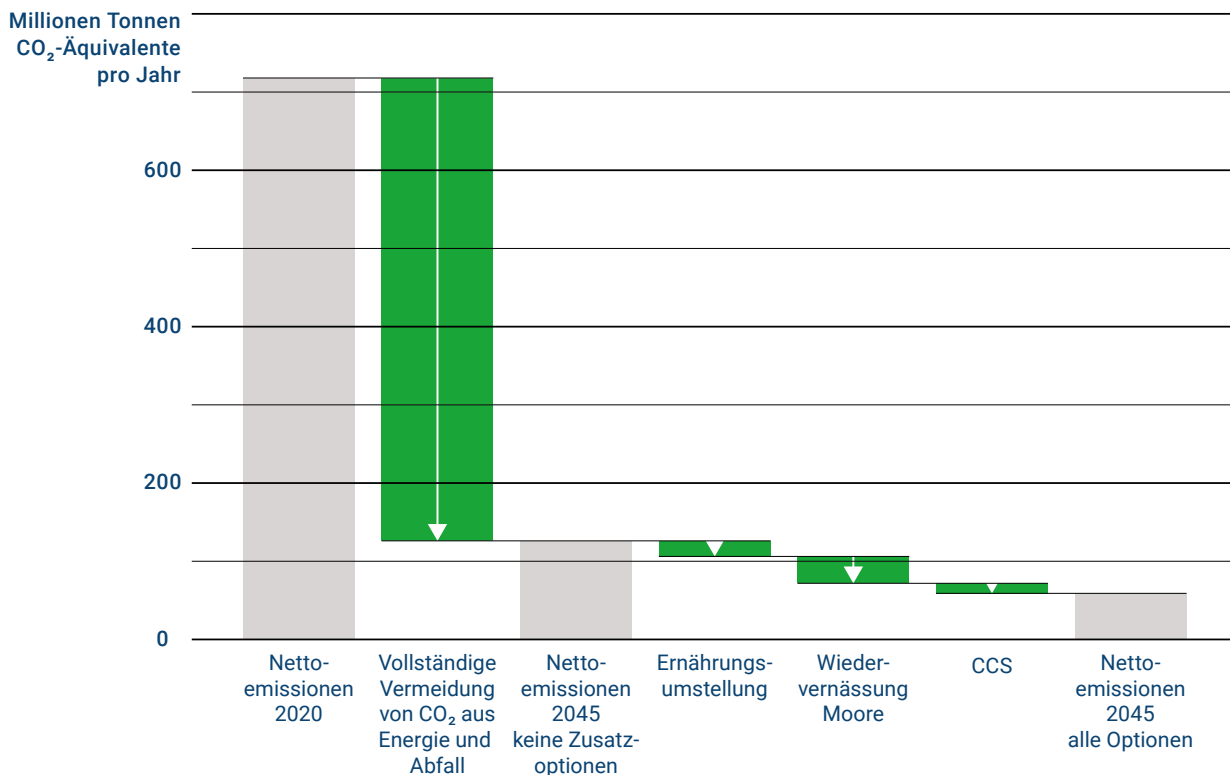
Für weitere Reduktionen müsste es zusätzlich gelingen, dass:

- **1,2 Millionen Hektar Moorflächen**, die aktuell als Acker- oder Grünland genutzt werden, **wiedervernässt** werden (Voraussetzung: Bereitschaft der Landwirt:innen; Ergebnis: Emissionsreduktion um bestenfalls 35 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente).

- alle Bürger:innen ihre **Ernährung auf mehr pflanzliches Eiweiß, Obst, Nüsse und Gemüse umstellen**, deutlich weniger Fleisch und damit gesünder essen und infolge der sinkenden Fleischnachfrage die Tierbestände, die Futterproduktion und das Gülleaufkommen reduziert werden können (Potenzial: Halbierung der Methanemissionen, 20-prozentige Reduktion der Lachgasemissionen, Freiwerden von Flächen; Gesamteinsparung: Treibhausgasemissionen in Höhe von 20 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente).
- die **Freisetzung industrieller Prozessemissionen (zum Beispiel bei der Zementherstellung) durch eine Kohlendioxidabscheidung mit anschließender geologischer Speicherung (CCS) reduziert** wird (Potenzial: Reduktion der Prozessemissionen um 10 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>; Voraussetzung: Aufbau der CCS-Infrastruktur für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung).

Werden alle diese Maßnahmenpakete optimal umgesetzt, ließe sich die Menge der deutschen Treibhausgasemissionen auf eine Restsumme von 62 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente reduzieren. Gleichzeitig würden 1,1 Millionen Hektar Landfläche frei, die für den Natur- und Artenschutz genutzt werden könnten. Um jedoch das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen die Restemissionen durch eine aus Klimaperspektive gleichwertige Kohlendioxidentnahme ausgeglichen werden.

Die hier genannten Zahlen stammen aus der Studie Merfort, A., Stevanović, M. & Strefler, J. (2023): „Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen?“, Kopernikus-Projekt Ariadne.



Deutschlands Treibhausgasemissionen auf ein Restminimum von 62 bis 130 Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalente zu reduzieren, setzt umfassende Transformationen voraus. Der wichtigste Schritt: eine vollständige Vermeidung aller CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energiegewinnung und Abfallbeseitigung.

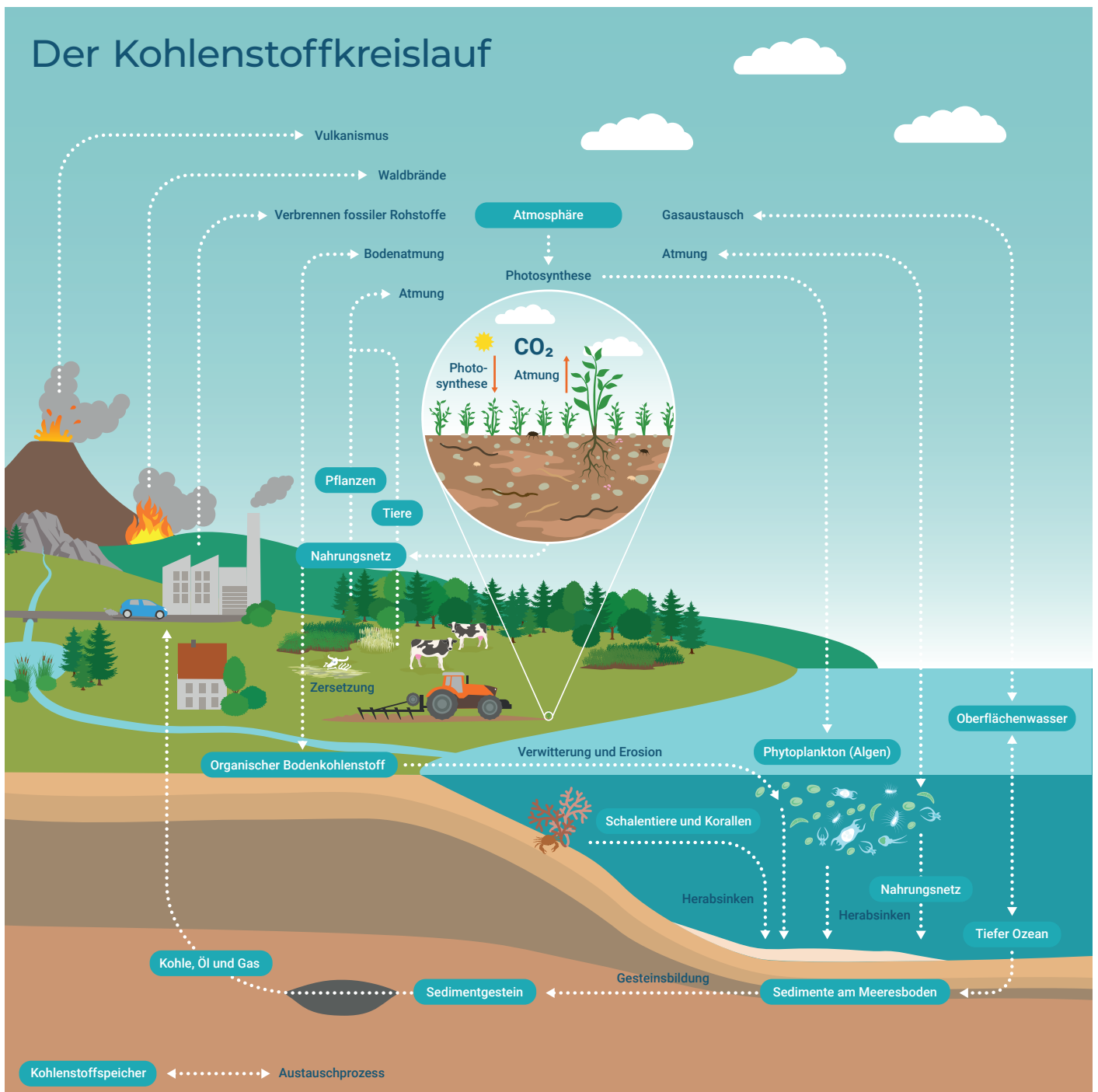
Grafik: Björn Maier/CDRterra nach einer Vorlage von Jessica Strefler/PIK.

# BIOLOGISCHE CDR-VERFAHREN: KOHLENSTOFF MITHILFE DER PHOTOSYNTHE BINDEN UND IN BIOMASSE, BÖDEN UND PRODUKTEN SPEICHERN

## Mechanismen der Kohlendioxidaufnahme und -speicherung

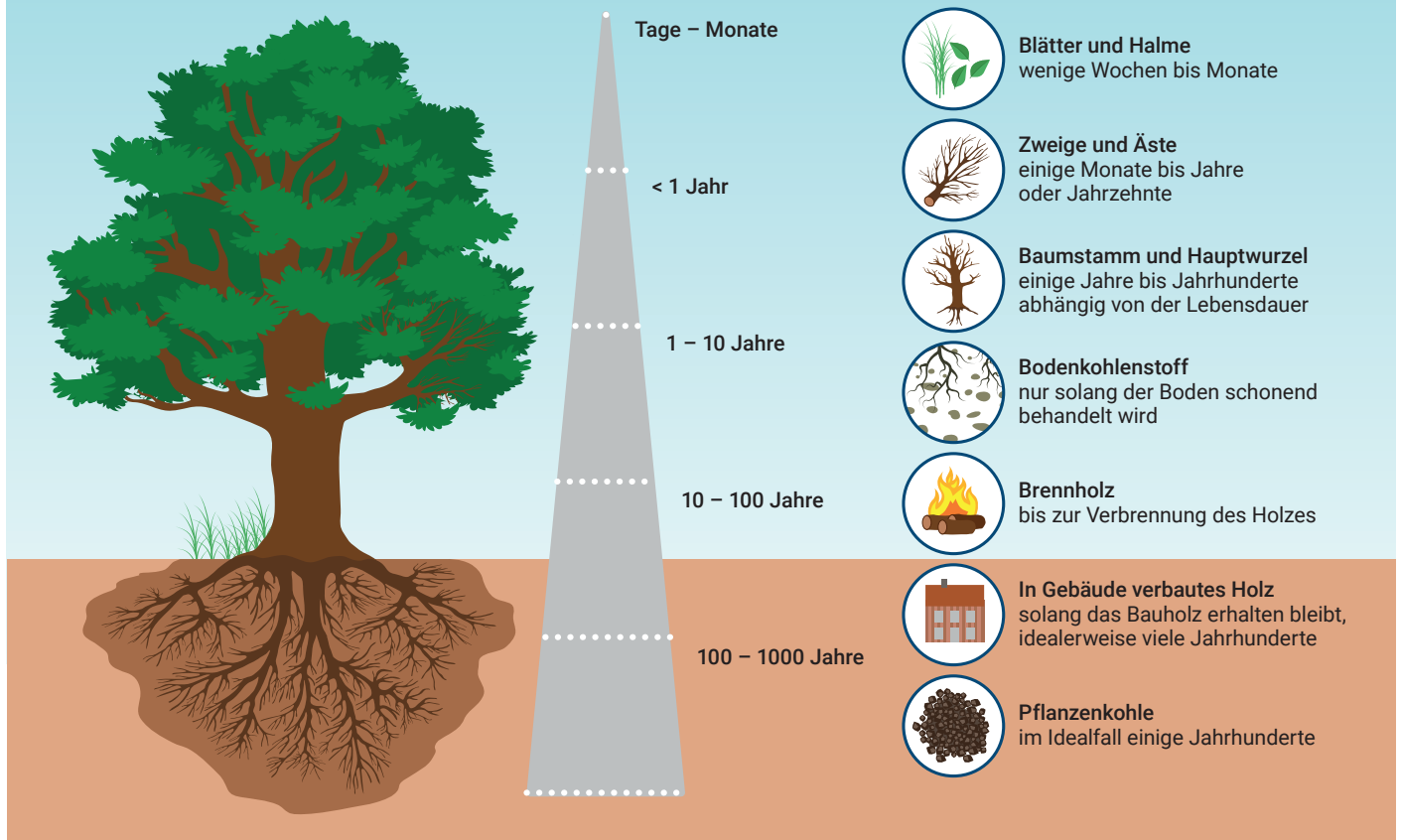
Die Vegetation und Böden der Welt sind Schlüsselakteure im natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde. Pflanzen nehmen Kohlendioxid aus der Umgebungsluft auf, zerlegen die Gasmoleküle im Zuge der Photosynthese und wandeln den enthaltenen Kohlenstoff in Kohlenhydrate um. Diese lagern sie anschließend in ihren Blättern, Halmen, Ästen, Stämmen oder Wurzeln ein. Das heißt, die Pflanzen bilden über- und unterirdisch neue Biomasse. Voraussetzung ist allerdings, dass die Pflanzen über ausreichend

Energie verfügen und diese nicht selbst durch eine Veratmung von Kohlenhydraten gewinnen müssen. Dabei verbrauchen die Pflanzen nämlich Kohlenhydrate und Sauerstoff und setzen Kohlendioxid frei. Veratmet wird Kohlenstoff jedoch auch im Boden: zum Beispiel durch Bakterien, Pilze und andere Mikroorganismen, die heruntergefallenes Laub, abgestorbene Wurzeln oder andere Tier- und Pflanzenreste abbauen, in Bodenkohlenstoff (hauptsächlich Humus) umwandeln und dabei Kohlendioxid freisetzen.



Vereinfachtes Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Grafik: Björn Maier/CDRterra nach einer Vorlage von Rita Erven, GEOMAR.

## Dauer der Kohlenstoffspeicherung in unterschiedlichen Formen von Pflanzenmaterial



So nutzen CDR-Verfahren die Kohlendioxidaufnahme und -speicherung der Pflanzen und Böden. Grafik: Björn Maier.

Der von den Pflanzen gespeicherte Kohlenstoff ist allerdings nur so lange sicher eingelagert, bis die Pflanzen absterben, von Tieren gefressen oder von Mikroorganismen zersetzt werden oder aber durch Feuer verbrannt werden. Sehr lange bleibt der Kohlenstoff in Pflanzenmaterial gespeichert, welches unter Sauerstoffabschluss im Boden, Küstensediment oder im Moor eingelagert wird, sodass Mikroorganismen wenig Chance haben, das Material zu zersetzen. Gleiches lässt sich über Holz sagen, welches als Bauholz verwendet wird und beispielsweise als gut konservierter Dach- oder Stützbalken viele Jahrhunderte überdauern kann.

Die größte natürliche Kohlenstofflagerstätte an Land sind Böden. Weltweit speichern Böden etwa viermal so viel Kohlenstoff wie alle Landpflanzen in ihrer oberirdischen Biomasse. In Deutschland kommen Wald-, Acker- und Grünlandflächen zusammen auf rund fünf Milliarden Tonnen organischen Kohlenstoff, der in den oberen 90 Zentimetern der Bodensäule eingelagert ist. Dieser natürliche Kohlenstoffspeicher ließe sich durch bodenschonende Land- und Forstwirtschaft ausbauen.

Konventionelle biologische CDR-Verfahren zielen darauf ab, dass Pflanzen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff zunächst in neuer Biomasse, anschließend zum Teil auch im Boden, speichern. Auf diesem Prinzip beruhen nicht nur Ansätze zur **Aufforstung und Wiederaufforstung** von Wäldern, sondern auch pflanzenbasierte Verfahren zur **Kohlenstoffsequestrierung in Böden** (Steigerung des Kohlenstoffgehalts im Boden).

Voraussetzung für eine zusätzliche Kohlendioxidaufnahme der Landvegetation und ihrer Böden ist allerdings, dass mehr Photosynthese betrieben wird oder natürliche Zersetzungsprozesse reduziert werden. Um das CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial der Wälder zu erhalten, müssen Rodungen zur Gewinnung von Acker- und Weideland weltweit gestoppt werden. Emissionen aus Zersetzungsprozessen lassen sich vermeiden, indem zerstörte Wälder, Feuchtgebiete und Grünlandflächen wiederhergestellt und existierende Ökosysteme fortan nachhaltig bewirtschaftet werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Photosyntheseleistung der Landvegetation zu steigern, sind Neuanpflanzungen an Orten, an denen zuvor keine Pflanzen gewachsen sind oder in Zeiträumen, in denen bislang keine Pflanzen angebaut wurden. Fachleute empfehlen zudem den Anbau von Zwischenfrüchten und mehrjährigen Kulturen in der Landwirtschaft. Deren unterirdische Biomasse kann den Humusgehalt des Bodens maßgeblich steigern, vor allem mit tiefreichenden Wurzeln. Ebenso denkbar ist es, den Einsatz **agroforstwirtschaftlicher Methoden** auszuweiten – zum Beispiel eine Mischung aus Bäumen und Ackerfrüchten anzubauen, anstelle von Ackerfrüchten als Monokultur.

Einen Schritt weiter gehen neue biologisch-technische CDR-Verfahren, auch hybride Verfahren genannt. Sie zielen darauf ab, das zusätzlich gebildete Pflanzenmaterial zu verwerten oder zu konservieren. Bei der **Energiegewinnung aus Biomasse mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung** (englisch: **Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS**) beispielsweise wird Pflanzenmaterial (zum Beispiel schnell



wachsende Gräser, Holz, Energiepflanzen oder Grünschnitt) zur Strom-, Wärme- oder Kraftstoffgewinnung genutzt. Das bei der Vergasung, Verbrennung oder bei der Raffination frei werdende Kohlendioxid wird abgetrennt, komprimiert und unterirdisch gespeichert. Mithilfe neuer Verfahren könnten aus pflanzlicher Biomasse auch direkt langlebige Materialien wie Carbonfasern hergestellt werden, so zum Beispiel aus Algenöl. Auch hierbei wird der enthaltene Kohlenstoff dann langfristig gebunden.

Bei der Herstellung von **Pflanzenkohle** hingegen verfolgt man das Ziel, den in zusätzlich erzeugter Biomasse enthaltenen Kohlenstoff in langfristig stabiles Material umzuwandeln. Da Pflanzenkohle in kleinen dezentralen Anlagen produziert werden kann, eignen sich auch Abfälle wie Holzreste, Sägespäne oder Stroh. Diese werden unter Luftabschluss auf Temperaturen von vielen 100 Grad Celsius erhitzt. Pyrolyse nennt man diesen Prozess. In Pflanzenkohle gebunden, bleibt der Kohlenstoff im Idealfall jahrhundertlang konserviert. In der Landwirtschaft kann die Pflanzenkohle zudem als Bodenverbesserer eingesetzt werden.

### VORTEILE UND RISIKEN BIOLOGISCHER CDR-VERFAHREN AN LAND

Konventionelle biologische CDR-Verfahren, wie die (Wieder-)Aufforstung von Wäldern und Maßnahmen zur Steigerung des Kohlenstoffgehalts in Böden, haben den großen Vorteil, dass sie in der Praxis bereits lange erprobt, schnell einsetzbar und vergleichsweise günstig umzusetzen sind. Richtig durchgeführt helfen sie nicht nur Restemissionen auszugleichen. Sie fördern unter Umständen auch die Artenvielfalt, mindern Klimarisiken, verbessern die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit im Erdreich und beeinflussen das lokale Klima positiv – um nur einige der vielen möglichen positiven Nebenwirkungen zu nennen. Außerdem werden konventionelle biologische CDR-Verfahren von der Bevölkerung vielerorts als „Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes“

verstanden und in der Regel breit unterstützt. Derzeit entnimmt die Menschheit der Atmosphäre pro Jahr rund zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid, mehr als 99 Prozent davon mithilfe konventioneller biologischer CDR-Methoden wie (Wieder-)Aufforstung und anderen forstwirtschaftlichen Maßnahmen.

Biologische CDR-Verfahren bringen allerdings auch Nachteile mit sich. Zum einen ist pflanzliche Biomasse als Kohlenstoffspeicher störungsanfällig. Bäume können durch Insektenbefall und infolge von Extremereignissen wie Stürmen, Dürren oder Waldbränden absterben. Bodenkohlenstoff geht verloren, wenn Ackerland und Grünland falsch oder zu intensiv bewirtschaftet werden. Das heißt, wenn zum Beispiel mehr Biomasse geerntet oder durch Weidetiere gefressen und verwertet wird, als auf dem Land verbleibt und in Bodenhumus umgewandelt werden kann. Ungewiss ist zudem, wie sich die Folgen des Klimawandels langfristig auf die Produktivität der Landvegetation auswirken werden. Während eine steigende Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zu verbesserten Photosyntheseleistungen der Pflanzen führt, schaden zunehmende Hitze und Wetterextreme den Ökosystemen an Land.

Ein weiterer Nachteil: Für einen klimawirksamen Einsatz mancher biologischer CDR-Methoden wird viel Land benötigt, welches unter Umständen dann nicht mehr für andere Nutzungsformen zur Verfügung steht. Baut man beispielsweise Energiepflanzen wie Mais auf Ackerflächen an, steht dieses Land nicht für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung. Der Anbau von Energiepflanzen in Monokultur schadet zudem den Böden und der Artenvielfalt. Oftmals erfordert er auch den Einsatz von Pestiziden, um Krankheiten und Schädlingen vorzubeugen. Probleme entstehen erfahrungsgemäß auch, wenn die Landnutzung zu CDR-Zwecken ohne die Beteiligung der lokalen Bevölkerung beschlossen und umgesetzt wird. Deren Wald- oder Landnutzungsbedürfnisse bleiben dann oft unberücksichtigt, was gravierende Folgen für die betroffenen Menschen vor Ort haben kann.

## LANDNUTZUNGSEMISSIONEN: PFLANZEN UND BÖDEN ALS KOHLENDIOXIDQUELLEN UND -SENKEN

Solang die Pflanzen an Land ungestört und auf natürliche Weise wachsen können, nehmen Vegetation und Böden in etwa genauso viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, wie Mikroorganismen durch die Zersetzung und Veratmung von Biomasse wieder freisetzen. Verändert der Mensch jedoch die Natur, indem er Wälder (brand-)rodet, Feuchtgebiete trockenlegt und natürliches Grünland in Ackerland verwandelt, beginnen Zersetzungsprozesse. Im Zuge dieser entweichen große Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre. Fachleute bezeichnen diese Emissionen als Landnutzungsemissionen.

Im Zeitraum 2013 bis 2022 führten weltweite Landnutzungsänderungen nach Angaben des „Global Carbon Projects“ in der Summe zu einer Freisetzung von knapp fünf Milliarden Tonnen

Kohlendioxid pro Jahr. Im Jahr 2023 machten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Landnutzungsänderungen mit 4,1 Milliarden Tonnen ein Zehntel der vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen aus.

Ungeachtet aller Landnutzungsänderungen fungieren die Wälder, Feuchtgebiete, Grünlandflächen und Ackerflächen unserer Welt dennoch als natürliche Kohlenstoffsенке und bremsen somit den Klimawandel. Das heißt, sie nehmen in der Summe mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, als sie durch Landnutzungsänderungen freisetzen. Hauptgrund ist, dass die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre das Pflanzenwachstum anregt.

Seit dem Jahr 1850 hat die globale Landvegetation rund ein Drittel der vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Landnutzung und fossilen Quellen aufgenommen und im Untergrund oder in ihrer Biomasse eingelagert. Den größten Anteil an dieser Kohlenstoffaufnahme und -speicherung hatten Wälder.

CDR-Methode	wichtige Vorteile	wichtige Nachteile
Wiederaufforstung	<ul style="list-style-type: none"> <li>● kostengünstig und sofort einsetzbar</li> <li>● kann Artenvielfalt fördern</li> <li>● kann das Lokalklima verbessern (z. B. Hitzeextreme abschwächen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● anfällig für Waldbrände/Krankheiten</li> <li>● Konkurrenz um (landwirtschaftliche) Flächen</li> </ul>
Aufforstung	<ul style="list-style-type: none"> <li>● kann das Lokalklima verbessern (z. B. Hitzeextreme abschwächen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sorgfältige Auswahl der Region nötig</li> <li>● anfällig für Waldbrände/Krankheiten</li> <li>● Konkurrenz um (landwirtschaftliche) Flächen</li> </ul>
Einsatz nachhaltiger, CO <sub>2</sub> -speichernder forstwirtschaftlicher Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Holzprodukte ersetzen emissionsintensivere Baumaterialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Veränderung der Lebensbedingungen für Flora und Fauna, z. B. durch weniger Totholz</li> </ul>
Agroforstwirtschaft (im Vergleich zu reinen Landwirtschaftsflächen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● fördert die Artenvielfalt</li> <li>● kann die Widerstandsfähigkeit gegen Klimaextreme erhöhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● komplexere Abläufe, schwierigerer Maschineneinsatz</li> <li>● wird oft im geringeren Umfang subventioniert</li> </ul>
Maßnahmen zur Steigerung der Kohlenstoffspeicherung im Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>● verbessert Bodenqualität</li> <li>● stellt oft Erosionsschutz dar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● hohes Risiko einer Umkehrung der Kohlenstoffspeicherung</li> <li>● schwer zu verifizieren</li> </ul>
Wiedervernässung von Mooren	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CO<sub>2</sub>-Emissionen werden durch Anhebung des Wasserstands annähernd gestoppt</li> <li>● fördert Artenvielfalt</li> <li>● reguliert den Wasserhaushalt der Region</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● erhöhte Methanemissionen verringern den Mitigationseffekt von annähernd gestoppten CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> <li>● konkurriert mit landwirtschaftlicher Produktion; Alternativen: Umstellung auf Paludikultur oder aufgeständerte Solarzellen</li> </ul>
Gewinnung von Bioenergie mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bioenergie ersetzt fossile Energieträger und fördert Energiesicherheit</li> <li>● hohe Langlebigkeit der Speicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● hoher Flächen- und Ressourcenbedarf (Wasser, Dünger, Transport etc.)</li> <li>● konkurriert mit Biodiversitätsschutz und Nahrungsmittelproduktion</li> <li>● CCS in geologischen Reservoirs nicht überall zulässig</li> </ul>
Umwandlung von Biomasse in Pflanzenkohle und deren anschließender Einsatz in der Landwirtschaft (biochar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● wirkt sich positiv auf Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit im Boden aus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● hoher Flächen- und Ressourcenbedarf (Wasser, Dünger, Transport etc.)</li> <li>● konkurriert mit Biodiversitätsschutz und Nahrungsmittelproduktion</li> <li>● CCS in geologischen Reservoirs nicht überall zulässig</li> </ul>
Herstellung langlebiger Bauelemente aus Naturstein und Carbonfasern aus Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>● neue Baustoffe ersetzen emissionsintensive Baumaterialien und speichern CO<sub>2</sub></li> <li>● Rohstoffe haben höhere Verfügbarkeit als Stahl, Zement und Sand bei gleichzeitig schonenderem Eingriff in die Natur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Konkurrenz um Biomasse möglich</li> <li>● technische Unsicherheiten bei der Algenproduktion</li> <li>● hohe Zulassungshürden für neue Baustoffe und Bauelemente</li> </ul>

Übersicht ausgewählter Vor- und Nachteile der in CDRterra untersuchten biologischen CDR-Methoden (grün = konventionelle Methode, orangefarben = neue Methode). Im Rahmen von CDRterra entwickeln Forschende eine umfassende Bewertungsmatrix für alle gelisteten Methoden.



# CHEMISCHE UND GEOCHEMISCHE CDR-VERFAHREN: KOHLENDIOXID SPEICHERN IN GESTEIN, BAUSTOFFEN UND ANDEREN PRODUKTEN

## *Mechanismen der Kohlendioxidaufnahme und -speicherung*

Kohlenstoff ist ein sehr bindungsfreudiges Element. Fachleute kennen mittlerweile weit mehr als eine Million verschiedene Kohlenstoffverbindungen und mit jedem Jahr kommen neue hinzu. Ihre Erforschung bildet daher eine eigene Fachrichtung in der Chemie. Aufgrund der chemischen Eigenschaften von Kohlenstoff und seiner gasförmigen Verbindung Kohlendioxid ergeben sich sowohl chemische als auch geochemische Verfahren der CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre.

Die geochemische Kohlendioxidentnahme basiert auf einer natürlichen Reaktion, die während der Verwitterung von bestimmten Gesteinen abläuft. Bilden sich Regentropfen, nehmen diese auf dem Weg Richtung Erdboden stets etwas Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf. Das Gas löst sich im Regenwasser und es entsteht Kohlensäure. Diese Säure greift Gesteine an, wenn der Regen darauf prasselt. Dabei lösen sich die Minerale des Gesteins auf und ihre Bestandteile werden in Grund- und Oberflächenwasser abtransportiert. In einem weiteren Schritt reagieren diese Bestandteile weiter und es bilden sich Karbonatminerale. Oder vereinfacht gesagt: Es entsteht neues Gestein (Mineralisierung), in welchem ein Teil des einstigen atmosphärischen Kohlendioxids fest und dauerhaft gebunden ist.

Dieser natürliche Prozess lässt sich künstlich beschleunigen – etwa indem man schnell verwitterndes Gestein mit hohem CO<sub>2</sub>-Bindungspotenzial fein zermahlt, zum Beispiel auf landwirtschaftlichen Flächen verteilt und der Witterung aussetzt. Entsprechende CDR-Verfahren werden als Methoden zur **beschleunigten Verwitterung** (englisch: **Enhanced (Rock) Weathering, ERW**) bezeichnet. Das Gesteinsmehl kann auch die Bodenfruchtbarkeit und damit die Ernteerträge verbessern, denn Basalt beispielsweise ist reich an Nährstoffen wie Kalium und Phosphor.

Die bekannten chemischen Entnahmeverfahren sind technische Lösungen. Dabei wird das Kohlendioxid mithilfe chemischer Filtermedien (fest oder flüssig) direkt aus der Umgebungsluft herausgefiltert (englisch: **Direct Air Capture, DAC**). Anschließend wird das CO<sub>2</sub> durch Wärmezufuhr und Druckänderung wieder gelöst. Das Kohlendioxid wird im nächsten Schritt in geologischen Speichern eingelagert (englisch: **Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS**). Die Speicherung gilt gemeinhin als dauerhaft – insbesondere, wenn das Kohlendioxid im Untergrund mineralisiert.

Im Entwicklungsstadium befinden sich noch **auf künstlicher Photosynthese basierende CDR-Verfahren**. Wie bei der natürlichen Photosynthese wird hierbei Kohlendioxid mithilfe von Energie aus Sonnenlicht in ein speicherbares und stabiles Endprodukt umgewandelt. Diese Umwandlung soll in einer eigens entwickelten photoelektrochemischen Zelle erfolgen. Das kohlenstoffhaltige Endprodukt kann anschließend eingelagert werden.

## *Vorteile und Risiken chemischer und geochemischer CDR-Verfahren an Land*

Chemisch-technische Verfahren zur Abscheidung von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft bieten den Vorteil, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung gut messbar ist, die CO<sub>2</sub>-Speicherung eine hohe Permanenz aufweist und die Verfahren vergleichsweise wenig Fläche in Anspruch nehmen.

Abgesehen von wenigen Pilotanlagen befinden sich chemisch-technische Verfahren zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft noch in der Entwicklungsphase. Der große Energiebedarf und die hohen Kosten für die technischen Anlagen verhindern aktuell noch einen Einsatz im größeren Maßstab. Erwartet wird, dass die Kosten für Bau und Betrieb der Anlagen langfristig sinken. Dennoch werden diese Verfahren künftig nur dort sinnvoll zum Einsatz kommen können, wo ausreichend Strom oder Wärme aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung stehen.

Der großflächige Einsatz von Verfahren zur beschleunigten Verwitterung hängt insbesondere davon ab, wie viel Fläche zur Ausbringung zur Verfügung steht. Verwendet werden können neben gezielt abgebauten Gesteinen auch Abfallprodukte wie Gesteinsstaub, der in Steinbrüchen oder beim Bergbau anfällt, oder aber industrielle Schlacken und Schutt von Gebäudeabrisse – vorausgesetzt, diese Materialien enthalten keine Giftstoffe oder Schwermetalle. Werden beim Abbau, Zerkleinern und Transport der Ausgangsstoffe fossile Energieträger eingesetzt, entstehen neue Kohlendioxidemissionen, die das Gesamtentnahmepotenzial reduzieren.

CDR-Methode	wichtige Vorteile	wichtige Nachteile
Beschleunigte Verwitterung von Gestein	<ul style="list-style-type: none"> <li>● bodenverbessernde, produktivitätssteigernde Eigenschaften</li> <li>● keine Flächenkonkurrenz mit anderen Methoden</li> <li>● kann parallel zu Pflanzenkohle z. B. angewendet werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ökologische Folgen von zusätzlichen Steinbrüchen und Transportinfrastruktur</li> <li>● verwendetes Material kann giftige Bestandteile enthalten</li> </ul>
Direkte Abscheidung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre mit anschließender langfristiger Speicherung (DACCS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● vergleichsweise geringer Flächenbedarf</li> <li>● CO<sub>2</sub>-Entnahme gut messbar</li> <li>● hohe Langlebigkeit der Speicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● hoher Energieverbrauch</li> <li>● hohe Investitionskosten für Anlagen und Geräte</li> <li>● CCS in geologischen Reservoirs nicht überall zulässig</li> </ul>
Künstliche Photosynthese	<ul style="list-style-type: none"> <li>● weniger Wasser- und Flächenbedarf als bei der Bioenergiegewinnung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -speicherung</li> <li>● erzeugt dauerhafte Speicherprodukte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Verfahren derzeit noch in der Entwicklung</li> </ul>

Übersicht ausgewählter Vor- und Nachteile der in CDRterra untersuchten chemischen und geochemischen CDR-Methoden. (grün = konventionelle Methode, orangefarben = neue Methode).

### DER SCHWIERIGE NACHWEIS: DIE KOHLENDIOXIDENTNAHME MESSEN, BILANZIEREN UND KONTROLLIEREN

Eines haben konventionelle CDR-Verfahren gemeinsam: Die durch sie erzielte Kohlendioxidentnahme lässt sich nur sehr schwer messen und kontrollieren. Das ist vor allem dann der Fall, wenn die eingesetzte CDR-Methode natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahmeprozesse verstärkt und eine zusätzliche, vom Menschen initiierte Kohlendioxidaufnahme nachgewiesen werden muss. Wie groß die Herausforderung in der Praxis sein kann, illustrieren Nachweisverfahren zur Kohlenstoffeinlagerung in Böden. Die Bodenkohlenstoffmessungen selbst sind nicht nur besonders aufwendig. Bevor ein Anstieg des Kohlenstoffgehaltes im Erdreich nachgewiesen kann, vergehen in der Regel drei bis fünf Jahre.

Aufgabe der Wissenschaft ist es deshalb, einheitliche Mess-, Kontroll-, und Bilanzierungsverfahren für CDR-Methoden an Land zu entwickeln (englisch: **Monitoring, Reporting and Verification, MRV**). Diese müssen die erzeugten Kohlenstoffflüsse genau erfassen. Sie sollten in der Praxis leicht anzuwenden sein, sich möglichst an jedem Standort einsetzen lassen und einheitlichen Standards zum Nachweis einer Kohlendioxidentnahme und langfristigen Speicherung folgen. Nur unter diesen Voraussetzungen wäre sichergestellt, dass:

- behauptete Kohlendioxidentnahmen von verantwortlichen Behörden oder Institutionen auf ihren Wahrheitsgehalt hin überprüft werden können,
- ein Nachweis der langfristigen Kohlendioxidspeicherung erfolgen kann und
- sichergestellt wird, dass die angewandte CDR-Methode der lokalen Umwelt und Bevölkerung nicht schadet.

Diese Garantien müssen CDR-Verfahren geben können. Andernfalls entziehen sowohl Investor:innen als auch Verantwortliche aus Politik, Forschung und Zivilgesellschaft den Verfahren ihr Vertrauen. Deren Unterstützung wird jedoch dringend benötigt, wenn Verfahren zur Kohlendioxidentnahme in dem Umfang ausgebaut werden sollen, der erforderlich ist, um die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu beschränken.

Für einige CDR-Methoden gibt es bereits erste Mess-, Kontroll-, und Bilanzierungsansätze. Etablierte oder gar zertifizierte Verfahrensabläufe für eine Kontrolle der angenommenen Entnahmen aber fehlen überwiegend. Aktuell ist auch ungewiss, mit welchem Maß an Präzision es Fachleuten gelingen kann, Kohlendioxidmengen, die mithilfe unterschiedlicher CDR-Methoden entnommen wurden, in ein konsistentes Bilanzierungssystem zu überführen. Es geht dabei zum Beispiel um die Frage, ob eine Tonne Kohlendioxid, die in Pflanzenmaterial gebunden ist, genauso verrechnet werden kann wie eine Tonne Kohlendioxid, die der Umgebungsluft mithilfe technischer Anlagen entnommen und langfristig im Untergrund gespeichert wurde. Da die verfügbaren Bilanzierungsverfahren jedoch Einfluß auf die Politikinstrumente haben werden, ist Forschung dazu jetzt notwendig.

Diese methodischen Unsicherheiten ändern jedoch nichts an der Aussage, dass verlässliche Kontroll- und Bilanzierungsverfahren dringend benötigt werden. Erstens können diese die öffentliche Akzeptanz von CDR-Verfahren steigern. Zweitens versetzen sie Aufsichtsbehörden in die Lage, gemeldete Entnahmen zu überprüfen und zu vergüten.

### WIE VIEL KOHLENDIOXID KANN DER ATMOSPÄRE TATSÄCHLICH MIT CDR-VERFAHREN AN LAND ENTNOMMEN WERDEN?

Die Frage nach dem Entnahmepotenzial einer oder mehrerer CDR-Verfahren lässt sich nicht in einem Satz beantworten, denn

Fachleute unterscheiden im Grunde zwischen verschiedenen Entnahmepotenzialen ein und derselben CDR-Methode. Dazu gehören:

- das technische Entnahmepotenzial: Es beziffert die Menge Kohlendioxid, die maximal entnommen werden könnte, wenn einem Einsatz des Verfahrens keinerlei Hindernisse im Weg stünden – weder Kosten noch mögliche Risiken für Mensch und Umwelt.
- ein Entnahmepotenzial, welches Kosten und Risiken der CDR-Methode berücksichtigt: Das heißt, das Verfahren käme nur dort zum Einsatz, wo dieser finanzierbar ist und Nebenwirkungen kompensiert werden können oder aber keine Rolle spielen.
- das Entnahmepotenzial im Falle eines tatsächlich nachhaltigen Einsatzes: Es umfasst die Menge entnommenen Kohlendioxids, wenn die Methode nur dort zum Einsatz käme, wo Mensch und Umwelt bestmöglich von ihrem Klimabeitrag und möglichen Mehrfachnutzen (Synergien) profitieren würden und mögliche Nebenwirkungen verhindert oder aber auf faire und gerechte Weise kompensiert werden könnten. Allerdings ist dieses Potenzial sehr schwer zu quantifizieren.

Diese Kategorisierung verdeutlicht: Es gibt eine Vielzahl technischer, sozioökonomischer, rechtlicher und auch politischer Fragen, deren Antworten bislang ungeklärt sind. Langfristig werden diese aber die Einsatzmöglichkeiten von CDR-Verfahren und damit auch ihr Entnahmepotenzial beschränken.

#### **Hürden eines großflächigen Einsatzes von CDR-Verfahren an Land**

Will die EU ihr Ziel der Treibhausgasneutralität in den nächsten Jahrzehnten erreichen, müssen zusätzlich zu schnellen und tiefgreifenden Emissionsminderungen CDR-Verfahren an Land schnellstmöglich eingesetzt werden – und zwar mit jedem Jahr in einem deutlich größeren Umfang. Aktuell stecken neuere technische Verfahren wie BECCS, die Herstellung von Pflanzenkohle oder aber die direkte Entnahme von Kohlendioxid aus der Luft allerdings noch in der Entwicklungsphase oder werden bisher nur in Pilotprojekten getestet. Ihre Entwicklung, Erprobung und weltweite Markteinführung zu erschwinglichen Preisen müssen daher dringend vorangetrieben werden.

Ein schnelles Hochfahren von CDR würde unter anderem bedeuten, dass in den kommenden 10 bis 15 Jahren weltweit Millionen Landwirt:innen Pflanzenkohle ausbringen und ihren Ackerbau auf nachhaltige Formen umstellen müssten. Zeitgleich müssen mehrere Tausend Anlagen zur Kohlendioxidabscheidung aus der Luft errichtet und Tausende Kilometer Leitungen für den Transport des abgeschiedenen Kohlendioxids verlegt werden. Die politischen Weichenstellungen für eine solche Ausweitung müssen jetzt getätigt werden. Andernfalls wird es nicht gelingen, der Atmosphäre zum Jahr 2050 jene Milliarden Tonnen Kohlendioxid zu entnehmen, welche die Klimaszenarien zur Einhaltung des Ziels vorsehen, die Erderwärmung auf „deutlich unter zwei Grad“ zu beschränken.

Fachleute empfehlen zudem, nicht nur auf eine CDR-Methode zu setzen, sondern auf ein Portfolio verschiedener Verfahren

– abhängig von den lokalen Gegebenheiten sowie von der Verfügbarkeit der jeweils benötigten Ressourcen, Anlagen und Infrastrukturen. Dazu gehören Wasser, Land, Dünger und Transportlogistik für den Anbau von Energiepflanzen, technische Anlagen sowie Strom und Wärme aus erneuerbaren Quellen für die Kohlendioxidentnahme aus der Luft sowie CO<sub>2</sub>-Leitungssysteme und geologische Speicher für abgeschiedenes Kohlendioxid. Nur durch den Einsatz einer Vielzahl von CDR-Methoden können Risiken wie die Frage der Dauerhaftigkeit (Permanenz) biologischer Speicher unter dem Klimawandel gestreut werden und den begrenzten Entnahmepotenzialen einzelner Methoden Rechnung getragen werden. Auch hier gilt wieder der Grundsatz: Wir Menschen können unsere Abhängigkeit von umfangreichen Kohlendioxidentnahmen reduzieren, indem wir unsere Treibhausgasemissionen schnellst- und bestmöglich minimieren und verfügbare Energie effizienter nutzen.

#### **Lückenhaftes Wissen, insbesondere über lokale Aspekte eines großflächigen CDR-Einsatzes**

Für eine umfassende und sachgerechte Bewertung einzelner Methoden oder Methodenportfolios wird Fachwissen zu allen CDR-Aspekten benötigt. Deshalb muss in jenen Bereichen verstärkt geforscht werden, wo aussagekräftige Ergebnisse bisher fehlen oder nur in Ansätzen vorhanden sind. Insbesondere müssen wir die lokalen und regionalen Aspekte einer Einführung und Ausweitung von CDR besser verstehen. Denn die regionalen und lokale Gegebenheiten bestimmen am Ende die Kosten, das Entnahmepotenzial sowie die Nebenwirkungen jeder einzelnen CDR-Methode. Sie bilden somit das Fundament für politische Entscheidungen zum Einsatz sowie zur Steuerung und Regulierung ausgewählter CDR-Verfahren.

#### **Die zentrale Rolle öffentlicher Akzeptanz großflächiger CDR-Einsätze**

CDR-Maßnahmen können nur dann großflächig eingesetzt werden, wenn die Öffentlichkeit und insbesondere die lokal betroffene Bevölkerung und wichtige Akteur:innen wie Landwirt:innen einem solchen Einsatz zustimmen und entsprechende Maßnahmen und Technologien unterstützen. Die Einstellung der Bevölkerung zu CDR ist somit ein entscheidender Erfolgsfaktor.

Wissenschaftliche Studien aus Westeuropa, den USA, Australien und Neuseeland zeigen jedoch, dass die Bevölkerung in diesen Regionen bislang wenig über CDR-Verfahren und die Notwendigkeit ihres Einsatzes weiß und sich bei ihrer Bewertung von eigenen Werten und Überzeugungen leiten ließ. Die Haltung der Menschen hing zudem davon ab, wie sie gefragt und informiert wurden. CDR-Methoden, welche die Befragten als natürlich einstufte, erfuhren mehr Unterstützung als Verfahren, welche als unnatürlich oder technisch wahrgenommen wurden. Positiver wurden zudem jene Verfahren bewertet, die sich kontrolliert einsetzen lassen, keine oder nur minimale Nebenwirkungen hervorrufen und bei denen die wissenschaftliche Unsicherheit über Risiken und Klimawirksamkeit gering ist. Fest steht außerdem: Um die Unterstützung der Öffentlichkeit für einen CDR-Einsatz zu gewinnen, müssen vor allem lokal betroffene Bevölkerungsgruppen von Anfang an in alle Diskussions- und Entscheidungsprozesse aktiv mit eingebunden werden.

## Würde der Einsatz technisch machbarer CDR-Verfahren den Weg in eine nachhaltige Entwicklung ebnen?

Nahezu alle Klimaszenarien, in denen es gelingt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius zu beschränken, bauen darauf, dass sowohl der Einsatz konventioneller CDR-Methoden an Land als auch die Anwendung neuer technischer Verfahren ausgeweitet wird. Für beides werden klare Umsetzungsstrategien, passende Infrastrukturen (zum Beispiel Transportwege und technische Anlagen) sowie Ressourcen wie Land, Wasser und Energie aus erneuerbaren Quellen benötigt.

Da Ressourcen begrenzt sind und im Falle eines CDR-Einsatzes im geringeren Umfang für andere Zwecke zur Verfügung stünden, steht unsere Gesellschaft vor schwierigen Entscheidungen: Es gilt, den Klimawandel wirksam zu begrenzen und gleichzeitig eine nachhaltige Entwicklung und damit eine lebenswerte Zukunft für alle Menschen auf der Erde zu sichern. So hat es die Staatengemeinschaft in den 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung festgeschrieben, die auch bei Überlegungen zum Einsatz von CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden berücksichtigt werden müssen. In diesen Zielen hat sich die Weltgemeinschaft unter anderem dem Klimaschutz, dem Schutz der biologischen Artenvielfalt sowie dem Recht des Menschen auf Frieden, Gesundheit, Bildung, ausreichend gesunde Nahrung und eine gerechte Behandlung verschrieben.

Sollen diese Nachhaltigkeitsziele erreicht werden, dürfen sie nicht durch mögliche negative Auswirkungen eines CDR-Einsatzes im industriellen Maßstab torpediert werden. Demzufolge stellt sich Entscheidungstragenden nicht nur die Frage, ob CDR-Methoden an Land technisch umgesetzt werden können und der Atmosphäre Kohlendioxid im erhofften Umfang entziehen. Es gilt

auch zu wissen, ob entsprechende Maßnahmen politisch, rechtlich, sozial und finanziell umsetzbar wären, welche zusätzlichen Vorteile und Risiken sie für Mensch und Umwelt mit sich bringen und ob die mit dem Einsatz verbundenen Auswirkungen eine nachhaltige Entwicklung fördern.

Diese kurzen Ausführungen zeigen: Wie viel Kohlendioxid der Atmosphäre mithilfe einer bestimmten CDR-Methode entnommen werden kann, hängt davon ab, in welchem Umfang diese eingesetzt werden kann und welche Bedingungen in den Einsatzgebieten vorherrschen. Lang erprobte Verfahren wie die Wiederaufforstung oder nachhaltige Formen der Waldwirtschaft und der Bodennutzung zur Steigerung des Bodenkohlenstoffgehalts können wir sofort einsetzen. Von diesen Methoden wissen wir, dass sich ihre Kosten und Nebeneffekte im Rahmen halten und Mensch und Umwelt sogar auf vielfache Weise von ihrem Einsatz profitieren können.

Dass der Klimawandel selbst das Überleben der Landvegetation und damit die Dauer der biologischen Speicherung in Frage stellt, birgt angesichts der schleppenden globalen Klimaschutzanstrengungen allerdings ein zunehmendes Risiko. Je nachdem, wie schnell und tief die globalen Treibhausgasemissionen sinken und wie sich unsere Gesellschaft entscheidet, was etwa Ernährungsgewohnheiten und damit verfügbare Flächen für Aufforstung oder Biomasseplantagen angeht, können die Potenziale biologischer Methoden zu klein und die Risiken einer erneuten Freisetzung von Kohlenstoff zu groß sein, um der Atmosphäre jene Menge Kohlendioxid zu entnehmen, die zur Kompensation der Restemissionen nötig wäre. Ein breites Portfolio an Maßnahmen sichert gegen eine Reihe von Risiken ab, daher müssen neue Verfahren jetzt getestet und weiterentwickelt werden.

## CDRTERRA – WEGE IN EINE TREIBHAUSGASNEUTRALE ZUKUNFT ERFORSCHEN

Im Forschungsprogramm CDRterra untersuchen über 100 Wissenschaftler:innen in zehn Verbundprojekten, wie und in welchem Umfang Methoden zur Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre an Land dazu beitragen können, den Klimawandel zu begrenzen. Dabei berücksichtigen sie politische, ökologische, technische, ökonomische und gesellschaftliche Fragen. Das Ziel der Forschenden ist, die Potenziale und Risiken der verschiedenen Verfahren umfassend und einheitlich zu bewerten. Auf Basis dieser Forschung können Politik, Wirt-

schaft und Öffentlichkeit anschließend jene CDR-Methoden auswählen, die von der Gesellschaft akzeptiert werden, politisch und technisch umsetzbar sind und von Fachleuten als ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll eingestuft wurden. Das Syntheseverhaben CDRSynTra führt die Ergebnisse aus allen Projekten zusammen. Es bildet zudem die zentrale Schnittstelle zur parallel laufenden Forschungsmission CDRmare, welche marine Verfahren der Kohlendioxidentnahme untersucht.

### IMPRESSUM

Prof. Dr. Julia Pongratz, [julia.pongratz@lmu.de](mailto:julia.pongratz@lmu.de)  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München

### Verantwortlich für den Inhalt:

Dr. Benjamin Bodirsky, Prof. Dr. Daniela Thrän,  
Prof. Dr. Erik Gawel, Dr. Felix Havermann,  
Prof. Dr. Jens Hartmann, Prof. Dr. Jürgen Bauhus,  
Prof. Dr. Julia Pongratz, Prof. Dr. Kira Rehfeld,  
Kolja Kuse, Dr. Matthias May,  
Prof. Dr. Niklas von der Aßén

### Redaktion: Karin Adolph

Texte: Sina Löschke, [schneehohl.net](mailto:schneehohl.net)

Design und Grafiken: Björn Maier // 05 2024

Diese Publikation entstand mit besonderer Unterstützung der Verbundprojekte STEPSEC und CDRSynTra.

