

Definitionen und Beschreibung von CO₂-Entnahmemethoden und -technologien für die Langfriststrategie Negativemissionen

Dokument für die Onlinebeteiligung

Einleitung

Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) hat die Bundesregierung im Jahr 2019/2021 Ziele für die Senkenleistung des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Land Use, Land Use-Change and Forestry, LULUCF) formuliert. Die im Mai 2024 verabschiedete Gesetzesnovelle unterstreicht die besondere Bedeutung des LULUCF-Sektors. Zudem legt die Novelle in § 3b KSG fest, dass eine „Langfriststrategie zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen“ zu erstellen ist, auf deren Grundlage im Rahmen einer Verordnungsermächtigung Ziele für „technische Senken“ definiert werden. Mit den Eckpunkten zur Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) stellte das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Februar 2024 bereits Kernelemente der Strategie und ihre Zielsetzung vor. Das vorliegende Dokument knüpft hier an, indem es die für die Erarbeitung der LNe initiale Begriffsklärungen und Beschreibungen der zu betrachtenden Methoden und Technologien zur Erzielung von Negativemissionen vornimmt.

Das KSG (§ 3b) ermächtigt die Bundesregierung, Ziele für technische Senken für die Jahre 2035, 2040 und 2045 festzulegen. Diese Ziele sollen gemeinsam mit den bereits bestehenden Zielen für den LULUCF-Sektor einen Beitrag zur Erfüllung der KSG-Zielvorgabe nach § 3 Absatz 2 KSG leisten, bis zum Jahr 2045 die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen und nach dem Jahr 2050 negative Treibhausgasemissionen zu erreichen. Die LNe betrachtet die Rolle von Negativemissionen in der deutschen Klimapolitik bis zum Jahr 2060 und schafft damit die Grundlage für die Ableitung von Zielwerten für technische Senken.

Das KSG enthält keine Definition für den Begriff „technische Senken“. Es spiegelt jedoch wider, dass Negativemissionen innerhalb des LULUCF-Sektors (§ 3a KSG) oder außerhalb bilanziert werden können. Die Abgrenzung des LULUCF-Sektors ist nach UNFCCC-Vorgaben geregelt. Die bilanzielle Zuordnung von technischen Negativemissionen ist jedoch auch auf UNFCCC-Ebene noch nicht abschließend geklärt. Unter welchen Gesichtspunkten die Zuordnung von CO₂-Entnahmemethoden zu § 3b KSG technische Senken erfolgen soll, ist im KSG nicht näher spezifiziert, ist jedoch erforderlich, um entsprechende Ziele zu setzen. Dieses Dokument soll daher die charakteristischen Merkmale der einzelnen CO₂-Entnahmemethoden und -technologien darstellen. Eine Zuordnung der Methoden zu den Zielen nach §§ 3a und 3b KSG erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der LNe.

Eine Bewertung wird in diesem Bericht nicht vorgenommen. Ebenfalls nicht betrachtet werden Klima- und Umweltwirkung, Fähigkeit für Monitoring, Reporting und Verification (MRV), Potenziale oder

Nutzungskonkurrenzen. Dies erfolgt in weiteren Betrachtungen im Rahmen der LNe. Abschließend ist anzumerken, dass es sich bei der CO₂-Entnahme um ein dynamisches Feld handelt, das sich ständig weiterentwickelt, sodass Methoden hinzukommen oder Funktionsweisen sich durch neue Entwicklungen ändern können.

1. Definitionen für die LNe

Die LNe soll ein gemeinsames Verständnis der Rolle von CO₂-Entnahmen für den Klimaschutz in Deutschland schaffen. Grundlage dafür bildet ein einheitliches Begriffsverständnis für Senken, CO₂-Entnahme und Negativemissionen.

Der Begriff **Senke** (engl. „sink“) ist die umfassendste Bezeichnung. Nach dem UNFCCC ist eine Senke ein „Vorgang, eine Tätigkeit oder ein Mechanismus, durch die ein Treibhausgas, ein Aerosol oder eine Vorläufersubstanz eines Treibhausgases aus der Atmosphäre entfernt wird“. Der Begriff beschreibt damit den Transfer von THG bzw. Vorläufersubstanzen aus der Atmosphäre in andere Kohlenstoffspeicher (terrestrisch oder ozeanisch). Angelehnt an dieses Verständnis ist im Bundes-Klimaschutzgesetz die Netto-Treibhausgasneutralität definiert als „das Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“. „Abbau“ bezeichnet dabei die THG--Entnahme aus der Atmosphäre.

Kohlenstoffspeicher (engl. carbon pools) binden Kohlenstoff außerhalb der Atmosphäre. Die Fließrichtung (in/aus einem Speicher) und Menge des ab- oder zufließenden Kohlenstoffs entscheiden über die (Netto-)Wirkung eines Speichers als Quelle oder als Senke. Dies wird mit der Ermittlung einer Bestandsänderung in Kohlenstoffspeichern (engl. carbon stock change) über ein Zeitintervall festgestellt. Formale Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Abbaus durch Senken werden in den Richtlinien zur THG-Berichterstattung nicht gestellt, zumal diese im jährlichen Berichtsformat auch nicht abgebildet werden können (IPCC, 2006).¹ Bislang fand die Einbindung von Kohlenstoff in Speichern hauptsächlich im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (engl. Land Use, Land-Use Change, and Forestry), statt.

Mit dem Begriff der **CO₂-Entnahme** (engl. Carbon Dioxide Removal, **CDR**) wird in der LNe die Entnahmeaktivität bezeichnet. Die LNe lehnt sich an die Definition der IPCC-Berichte an, wonach CO₂-Entnahme definiert ist als „anthropogene Aktivitäten, bei denen Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entnommen und langfristig in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten gespeichert wird“ (IPCC, 2022, 2024).² Eine CO₂-Entnahme kann durch biologische, chemische, oder physikalische Prozesse erfolgen. Dazu gehört die CO₂-Bindung durch Photosynthese beim Wachstum des Waldes genauso wie die technische Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre. In

¹ Für einige Holzprodukte wird die Dauerhaftigkeit der Speicherung berücksichtigt.

² Der Begriff des Abbaus (engl. removal) aus der UNFCCC und den IPCC Richtlinien stellt formal keine Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von THG-Entnahmen. Begründen lässt sich dies mit Blick auf das Prinzip der Erfassung von Kohlenstoff-Bestandsänderungen im LULUCF-Sektor und dem Format der jährlichen Inventarberichterstattung. Im Unterschied dazu umfasst das Begriffsverständnis der CO₂-Entnahme im Rahmen der LNe Aspekte der Dauerhaftigkeit, u.a. aufgrund der Berücksichtigung von Senken in nicht-LULUCF-Sektoren. Die Rahmenbedingungen auf UNFCCC-Ebene werden im Governance-Teil der LNe näher beleuchtet.

der LNe sind in dem Begriff der CO₂-Entnahme alle Treibhausgase eingeschlossen, auch wenn bislang einzig die CO₂-Entnahme als praxisrelevant angesehen wird. Alternativ kann daher auch der Ausdruck "Entnahme von Treibhausgasen" (engl. greenhouse gas removal) genutzt werden. Eine Übersicht aktueller Definitionen der CO₂-Entnahme kann der Box (siehe unten) entnommen werden.

Das Ergebnis der CO₂-Entnahme können **Negativemissionen** sein, wenn dadurch mehr Treibhausgase aus der Atmosphäre entnommen als freigesetzt werden. Häufig ist eine Verkettung mehrerer Prozessschritte erforderlich, um insgesamt negative Emission zu erreichen. Ob und in welcher Höhe eine Entnahme zu Negativemissionen führt, hängt von der Gesamtbilanz der direkten und indirekten THG-Emissionen und -Entnahmen der einzelnen Prozessschritte ab. Dabei muss auch die Wirkung im Gesamtsystem berücksichtigt werden.

Die LNe betrachtet nicht die Abscheidung und Speicherung von fossilem CO₂ an Punktquellen (fossiles CCS), da sich damit keine negativen Emissionen erzielen lassen, sondern lediglich verhindern lässt, dass fossiles CO₂ überhaupt erst in die Atmosphäre gelangt. Gleichwohl kann CCS in Kombination mit CO₂ aus der Atmosphäre (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) oder biogenem CO₂ (Bio Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS) die Speicherkomponente für CO₂ sicherstellen.

Negativemissionen sind zudem klar vom Solar Radiation Management (SRM) zu unterscheiden. SRM entfernt der Atmosphäre kein CO₂ und ist daher nicht Gegenstand der LNe.

Weitere bestehende Definitionen von CO₂-Entnahme (abweichend von IPCC)

State of CDR

“Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre und dessen Speicherung für Jahrzehnte bis Jahrtausende. Das abgeschiedene CO₂ muss aus der Atmosphäre stammen, nicht aus fossilen Quellen. Das CO₂ kann direkt oder indirekt aus der Atmosphäre entnommen werden, z. B. über Biomasse oder Meerwasser. Die anschließende Speicherung muss dauerhaft sein, so dass das CO₂ nicht bald wieder in die Atmosphäre gelangt. Die Entnahme muss die Folge eines menschlichen Eingriffs sein, zusätzlich zu den natürlichen Prozessen der Erde. Es ist wichtig, CDR von anderen verwandten Begriffen und Konzepten wie CCU und CCS zu unterscheiden.” (Smith et al., 2023)

CDRmare / CDRterra

CDRterra (Drei Kriterien basierend auf der IPCC Definition):

- „1. Das entnommene Kohlendioxid muss aus der Atmosphäre stammen.
2. Die anschließende Speicherung muss sicher und dauerhaft sein.
3. Die Kohlendioxidentnahme muss durch menschliche Aktivitäten und zusätzlich zu den natürlichen Aufnahmeprozessen der Erde erfolgen.” (Pongratz et al., 2024)

Carbon Removal and Carbon Farming Verordnung (CRCF)

Die EU-Richtlinie über einen Zertifizierungsrahmen für nachhaltige Kohlenstoffentnahmen definiert „carbon removal“ ebenfalls entlang der IPCC Definition: „die anthropogene Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre und seine dauerhafte Speicherung in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in langlebigen Produkten.“ Ferner unterscheidet sie zwischen verschiedenen Arten von „carbon removal“-Aktivitäten. Diese Unterscheidung wird untenstehend im letzten Kapitel näher vorgestellt. (Europäisches Parlament, 2022)

DIN SPEC 91458

„Anthropogene Handlung der langfristigen Bindung von CO₂ in anthropogen erschlossenen oder verstärkten Senken, die den Gehalt an CO₂ in der Erdatmosphäre reduziert.“

2. Beschreibung der einzelnen Methoden und Technologien zur CO₂-Entnahme

Grundsätzlich sollen alle zur Verfügung stehenden Methoden und Technologien betrachtet werden, mit denen negative Emissionen erzielt werden können. Die Auswahl der im Folgenden aufgeführten Methoden beinhaltet die Liste aus dem Eckpunktepapier und orientiert sich zudem an den in CDRterra und CDRmare untersuchten Methoden. Damit entspricht sie weitgehend den vom IPCC betrachteten Methoden, geht aber in Teilen darüber hinaus. Damit wird sichergestellt, dass ein umfassendes Bild möglicher CO₂-Entnahmemethoden und -technologien auf Basis des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes als Grundlage für die Strategieerstellung dient.

Bei verschiedenen Methoden der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre kann zwischen biologischen, geochemischen und chemischen Methoden differenziert werden. Die Bindungsform, der weitere Weg und dauerhafte Verbleib des Kohlenstoffs kann sich erheblich unterscheiden. Auf die komplexen Fragen der Klimawirkung und Bewertung dieser Methoden und Technologien wird hier noch nicht eingegangen. Einige Methoden und Technologien beinhalten nur Teilschritte auf dem Weg von der Entnahme aus der Atmosphäre bis zur dauerhaften Speicherung.

Waldmanagement

Die Waldbewirtschaftung umfasst alle Tätigkeiten und Funktionen, die dazu beitragen, dass der Wald seine vielfältigen Schutz-, Nutz- und Wohlfahrtsfunktionen erfüllen kann (Cames et al., 2023). Bäume entziehen der Atmosphäre CO₂ durch Photosynthese und speichern dieses durch die Bildung von Biomasse (Holz). Die nachhaltige Nutzung der Wälder, damit verbunden die Nutzung der Ernteprodukte, ist dem Klimaschutz zuträglich, wenn der Kohlenstoff in Holzprodukten mittel- bis langfristig gespeichert wird und fossile Brennstoffe ersetzt werden. In Deutschland sind Wälder nach den neuesten Erkenntnissen der vierten Bundeswaldinventur eine Kohlenstoffquelle. Die Trockenheit der letzten Jahre und die damit in Verbindung stehenden Insektenkalamitäten haben insbesondere in Fichtenwäldern große Schäden hinterlassen, der Kohlenstoffgehalt der Wälder ist gesunken.

Die Form der Bewirtschaftung von Wäldern hat Einfluss auf deren Klimaresilienz, Speicherung und Entnahme von CO₂ sowie weitere Leistungen des Waldes für Natur und Gesellschaft. Eine vorsorgende Anpassung der Wälder an den Klimawandel durch Waldmanagement kann Klimarisiken für den Wald selbst und damit auch seiner Funktionen abfedern.

Aufforstung/Wiederaufforstung

Bei der (Wieder-)Aufforstung entzieht das Wachstum der Bäume durch Photosynthese der Atmosphäre CO₂ und speichert es durch die Bildung von Biomasse (Holz) (Erlach et al., 2022; Pongratz et al., 2024), damit führen neue Waldflächen immer zu einer Vergrößerung des Kohlenstoffvorrates in der Biomasse. Nach den IPCC-Methoden versteht man unter Aufforstung das Pflanzen von Bäumen auf Flächen, die bisher nicht bewaldet waren. Wiederaufforstung bezeichnet die Aufforstung von Flächen, die historisch Wald waren und nach der Rodung einer anderen Landnutzung als Wald dienen (IPCC, 2000). In Deutschland ist die Unterscheidung zwischen „echter“ Aufforstung und Wiederaufforstung nicht möglich, da in den meisten Fällen Wald die potenziell natürliche Vegetationsform war. Zur (Wieder-)Aufforstung kann auch

als aktive Maßnahme die Saat von Baumsamen sowie die Naturverjüngung beitragen.

Agroforstsysteme

Unter Agroforstsystemen ist die Integration von Nutzgehölzen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zu verstehen. Dazu gehören beispielsweise Gehölzstreifen (Wertholz, Obstgehölze und/ oder Energieholz) auf Äckern oder Grünland. Agroforstsysteme führen zu einer Erhöhung der Biomasse pro Fläche, da in den Gehölzen und im Boden mehr organischer Kohlenstoff eingelagert wird (Cames et al., 2023). Das Potenzial ist dabei abhängig von der Gehölzart und der Bepflanzungsdichte.

Kohlenstoffanreicherung im Boden

In Böden sind große Mengen Kohlenstoff gespeichert. Hierbei handelt es sich sowohl um lebende Biomasse, z.B. Wurzeln, als auch um abgestorbene und teilweise zersetzte Biomasse, die als Humus wichtig für viele Bodenfunktionen ist.

Pflanzen entziehen während ihres Wachstums durch Photosynthese der Atmosphäre CO₂ und speichern den Kohlenstoff in ihrer Biomasse. Nach dem Absterben der Pflanzen, z.B. nach der Ernte, zersetzen Bodenorganismen das abgestorbene Pflanzenmaterial und setzen dabei CO₂ frei. Ein Teil des Pflanzenmaterials wird jedoch in organische Bodensubstanz (Humus) umgewandelt und kann längere Zeit im Boden verbleiben, bevor es wieder abgebaut wird (Cames et al., 2023).

Durch gezielte Bodenbewirtschaftung kann der Kohlenstoffgehalt des Bodens erhöht oder verringert werden (Humusaufbau oder -abbau). Eine Anreicherung von Kohlenstoff im Oberboden kann durch konservierende Landwirtschaft (minimale Bodenbearbeitung, dauerhafte Bodenbedeckung, z. B. durch Belassen von Ernterückständen auf dem Feld und Anbau mehrjähriger Futterpflanzen), Diversifizierung/Verbesserung der Fruchtfolgen (z. B. Gründüngung) oder Umwandlung von Ackerland in Grünland erreicht werden. Die Anreicherung im Unterboden erfolgt durch den Anbau tiefwurzelnder Pflanzen (Cames et al., 2023; Pongratz et al., 2024).

Humus ist jedoch nicht nur aus Sicht der Kohlenstoffspeicherung wichtig, sondern zentral für die Bodenstruktur und somit für die Bodenfruchtbarkeit, Bodengesundheit und die Klimaanpassung.

Wiedervernässung von Mooren

Trockengelegte Moore geben CO₂ an die Atmosphäre ab, da der Torf, der aus nicht oder unvollständig zersetzter Pflanzenmasse besteht, nicht mehr durch nasse Bedingungen vor der Zersetzung bewahrt wird. Deutschland verfügt nur über wenig intakte Moore, die tatsächlich wachsen und so der Atmosphäre CO₂ entnehmen. Überwiegend wurden Moore in Deutschland für die land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung und zur Torfgewinnung entwässert. Durch die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren können die CO₂-Emissionen signifikant gemindert und bei optimaler Vernässung gestoppt werden.

Eine anschließende Nutzung der wiedervernässten Flächen kann über sogenannte Paludikultur (z.B. der Anbau von Schilf oder Torfmoose oder auch die Beweidung durch Wasserbüffel) erfolgen, die an die

nassen Bedingungen angepasst ist. Der im Torf gespeicherte Kohlenstoff bleibt auf diese Weise im Boden gebunden (Emissionsvermeidung) (Humpenöder et al., 2020; Pongratz et al., 2024).

Langfristig und unter bestimmten Bedingungen kann die Wiedervernässung von Mooren auch zu einer Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre führen. Voraussetzung hierfür ist, dass der Torfkörper wächst und dabei mehr CO₂ bindet, als durch die anaerobe Umsetzung des Kohlenstoffs im Torfkörper an CO₂-Äquivalenten in Form von Methan emittiert wird (Günther et al., 2020). Im Wesentlichen stellt die Erhaltung bzw. Wiedervernässung von Mooren jedoch eine Emissionsvermeidungsmaßnahme dar. Aufgrund des langfristig vorhandenen Potenzials zur Erhöhung der Netto-Negativemissionen des LULUCF-Sektors wird die Wiedervernässung von Mooren in der LNe berücksichtigt.

Pflanzenkohle

Diese Methode umfasst mehrere Prozesse: die Bindung von CO₂ durch Photosynthese während des Wachstums der Biomasse sowie die pyrolytische Verkohlung der Biomasse. Der Kohlenstoff in den pflanzlichen Ausgangsstoffen kann als Pflanzenkohle (Biochar) langfristig gebunden werden. Die Speicherdauer variiert je nach Nutzungsform der Pflanzenkohle. Die Pflanzenkohle kann als Rohstoff für technische Anwendungen genutzt werden oder in Baumaterialien eingearbeitet werden. Auch eine bodenbezogene Verwendung kann unter bestimmten Voraussetzungen in Betracht kommen.

Bei der Umwandlung entstehende Nebenprodukte wie Pyrolyseöl und -gas können stofflich oder energetisch genutzt werden. Auch kann je nach Prozessbedingungen nutzbare Abwärme anfallen (Cames et al., 2023).

Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS)

Unter BECCS versteht man die energetische Nutzung bzw. Umwandlung von Biomasse unter Abscheidung und geologischer Speicherung von CO₂ (CCS). Die Methode umfasst dabei mehrere Prozessschritte: die Bindung von CO₂ durch Photosynthese während des Wachstums der Biomasse sowie die energetische Nutzung und Umwandlung der Biomasse (z.B. in Kraftwerken, Biogasanlagen oder industriellen Prozessen) mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (Pongratz et al., 2024). In Abhängigkeit von der Herkunft und dem Transport der Biomasse kann mit BECCS eine klimawirksame CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre erreicht werden.

Zunehmend wird der Begriff BioCCS verwendet, um explizit auch nicht energetische biomassebasierte Prozesse (wie z.B. Gärprozesse) abzubilden. Das vorliegende Begriffsverständnis von BECCS umfasst diese Prozesse.

Die Abscheidung von CO₂ aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) manchmal auch als WACCS (engl. Waste Carbon Capture and Storage) bezeichnet, betrifft sowohl fossiles CO₂ (etwa aus der Verbrennung von konventionellen Kunststoffen) als auch biogenes CO₂ (z.B. aus Lebensmittelabfällen). Die Abscheidung und Speicherung von Letzterem ist im vorliegenden Begriffsverständnis von BECCS abgedeckt.

Der Einsatz von Bioenergie kann zudem fossile Energieträger ersetzen, wobei nicht jede Art der energetischen Verwertung mit Abscheidung zu einem Energieüberschuss führt (Borchers et al., 2022).

Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)

Bei DACCS wird CO₂ über technische Anlagen direkt aus der Umgebungsluft gefiltert und abgeschieden, um es anschließend einer geologischen Speicherung zuzuführen. Die Abscheidung erfolgt über chemische oder physikalische Prozesse, bei denen CO₂ von den übrigen Bestandteilen der Atmosphäre getrennt wird. Dies geschieht beispielsweise durch die selektive Bindung des CO₂ an einen Feststoff oder in einer Flüssigkeit. Im Anschluss kann in geologische Speicherstätten eingebracht werden (Pongratz et al., 2024; Prognos, 2021).

Die Effizienz der CO₂-Entnahme ist dabei abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung. Bei hoher CO₂-Intensität der eingesetzten Energie kann der Prozess zu einer Quelle für THG-Emissionen werden.

Kohlenstoffbindung in Produkten

Die Herstellung von Produkten, die Kohlenstoff enthalten, der der Atmosphäre entnommen wurde, kann zu einer dauerhaften Entnahme von CO₂ führen. Entscheidend ist, inwieweit die entsprechenden Kohlenstoffspeicher dann in ihrer Größe anwachsen und damit nachweislich zu einer CO₂-Entnahme führen. Die Produkte können beispielsweise chemische Produkte wie Kunststoffe sein, die auf der Basis von atmosphärischem oder biogenem CO₂ oder Biomasse hergestellt werden, langlebige Holz-, Bau- und Dämmprodukte oder Materialsysteme aus Gestein oder Kohlenstofffasern.

Eine langfristige stoffliche Nutzung von Biomasse wird beispielsweise über die Verwendung als (Holz-)Bau- oder Dämmmaterial in der tragenden Konstruktion von Gebäuden sichergestellt. Dabei können verschiedene stoffliche Nutzungen zu Nutzungsketten im Sinne der Kreislaufwirtschaft kombiniert werden.

Neben der CO₂-Bindung können die Produkte zur Emissionsminderung beitragen, indem sie Produkte wie beispielsweise Zement oder Kunststoffe fossilen Ursprungersetzten.

Künstliche Photosynthese

Analog zur natürlichen Photosynthese soll bei der künstlichen Photosynthese die Energie des Sonnenlichts genutzt werden, um Kohlendioxid aus der Umgebungsluft aufzunehmen und in kohlenstoffhaltige Produkte umzuwandeln.

Die Umwandlung von CO₂ erfolgt durch photoelektrochemische Prozesse. Potenziell ist die Synthese einer Vielzahl verschiedener kohlenstoffreicher Produkte möglich, die dann dauerhaft in langlebigen oder kreislauffähigen Produkten gespeichert werden können (Krämer et al., 2022; Pongratz et al., 2024).

Beschleunigte Verwitterung von Gesteinen

Durch die natürliche Verwitterung von basischen Gesteinen oder Mineralen (z.B. Olivin, Basalt oder Peridotit) wird CO₂ in den Reaktionsprodukten gebunden und so der Atmosphäre entzogen. In der Natur laufen diese Reaktionen sehr langsam ab. Durch Vergrößerung der reaktiven Oberfläche von Gesteinen

durch Vermahlung kann der Stoffumsatz pro Zeiteinheit und damit die CO₂-Bindung erhöht werden. Dazu wird das Gestein abgebaut und nach dem Zermahlen auf Böden oder ins Meer ausgebracht (siehe auch Alkalinitätserhöhung). Bei der Verwitterungsreaktion entstehende (Bi-)Karbonat-Ionen binden Kohlenstoff anorganisch in der Hydrosphäre (Fuss et al., 2018; Goll et al., 2021).

Alkalinitätserhöhung

Der Ozean nimmt auf natürliche Weise CO₂ aus der Atmosphäre auf. Dabei wird CO₂ an der Meeresoberfläche gelöst und zum Teil chemisch gebunden. Die dabei entstehenden Protonen führen zur Versauerung des Ozeans. Säurebindende Mineralien, die aus Verwitterungsgesteinen an Land stammen und durch natürliche Prozesse ins Meer gelangen, wirken dieser Versauerung entgegen und ermöglichen so eine weitere Aufnahme von CO₂ (CDRmare, 2023b).

Die Alkalinitätserhöhung im Ozean beschreibt das Einbringen größerer Mengen säurebindender Substanzen durch den Menschen, bspw. Minerale wie Kalk, Silikat oder auch Hydroxide, mit dem Ziel, die Funktionsweise des natürlichen Prozesses zu emulieren und zu verstärken, um eine größere CO₂-Aufnahme zu erreichen. Zugleich könnte in Meeresregionen mit hoher Ozeanversauerung dieser für viele Meeresorganismen schädliche chemische Prozess umgekehrt werden, was die Erholung von Korallenriffen und Muschelbänken erleichtern könnte (CDRmare, 2023b)

Künstlicher Auftrieb

Durch die biologisch-physikalische Kohlenstoffpumpe entnimmt der Ozean der Atmosphäre auf natürliche Weise CO₂. Wenn nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt, verstärkt es das Algenwachstum, welches durch Photosynthese Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Biomasse bindet. Durch natürliche Prozesse wird anschließend ein Teil des gebundenen Kohlenstoffs in tiefere Lagen des Ozeans transportiert und dort gespeichert. Beim künstlichen Auftrieb soll dieser Prozess verstärkt werden, indem Tiefenwasser an die Oberfläche gepumpt wird (CDRmare, 2023a).

Marine Biomasse

Bei diesen Methoden wird marine Biomasse wie Algen auf Plattformen in Schelfmeeren oder auf dem offenen Ozean angebaut, um den Kohlenstoff, der beim Pflanzenwachstum mittels Photosynthese aus dem Wasser aufgenommen wird, zu binden. Das erforderliche CO₂ wird dabei nicht direkt der Atmosphäre, sondern aus dem Wasser entnommen, in dem es gelöst ist. Für eine langfristige Bindung des Kohlenstoffs wäre die Ernte der Biomasse erforderlich.

Nach der Ernte könnte die Biomasse landbasierten Methoden wie BECCS zugeführt oder gezielt auf den tiefen Meeresboden versenkt werden.

Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement)

Küstennahe Ökosysteme wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven und Tangwälder sind hochproduktive Ökosysteme und CO₂-Senken. Sie nehmen bei der Photosynthese CO₂ aus der Atmosphäre und dem Meerwasser auf und binden den darin enthaltenen Kohlenstoff, hauptsächlich im Untergrund.

Dies geschieht zum einen als lebende Biomasse in den Wurzeln, zum anderen in Form der abgestorbenen Pflanzenteile, die zu Boden sinken und in den Küstensedimenten eingeschlossen werden. Küstensedimente sind sauerstoffarm und salzhaltig. Dies schützt vor der zeitnahen Zersetzung und Freisetzung des enthaltenen Kohlenstoffs. Ein Teil des lokalen und zugetragenen organischen Materials wird so im Untergrund konserviert. Durch die Wiederherstellung verloren gegangener, die Erweiterung bestehender, und die Aufforstung bislang nicht bepflanzter Flächen kann die CO₂-Entnahme von küstennahen Ökosystemen erhöht und der Atmosphäre dauerhaft CO₂ entnommen werden (CDRmare, 2023b).

Weitere Methoden und Technologien

Die Entwicklung der CO₂-Entnahme ist ein dynamisches Feld, in dem immer wieder neue Verfahren entwickelt werden. Innerhalb der LNe wird kontinuierlich evaluiert, ob diese im Detail zu betrachten und bewerten sind. Bei den oben beschriebenen Methoden und Technologien wird in jedem Fall eine Bewertung erfolgen.

Literaturverzeichnis

Borchers, M., Thrän, D., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Förster, J., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., Li, Z., Mengis, N., Reusch, T. B. H., Rhoden, I., Sachs, T., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., . . . Yeates, C. (2022). Scoping carbon dioxide removal options for Germany—What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? *Frontiers in Climate*, 4, Artikel 810343. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.810343>

Cames, M., Mader, C., Hermann, A., Köhler, A. R., Malinverno, N., Möller, M., Niesen, B., Som, C. & Wäger, P. (2023). *Chancen und Risiken von Methoden zur Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. <https://doi.org/10.3218/4153-8>

CDRmare. (2023a). *Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres*. CDRmare. https://doi.org/10.3289/CDRmare.13_V2

CDRmare. (2023b). *Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans*. CDRmare. https://doi.org/10.3289/CDRmare.11_V2

CDRmare. (2023c). *Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres*. CDRmare. https://doi.org/10.3289/CDRmare.07_V2

Erlach, B., Fuss, S., Geden, O., Glotzbach, U., Henning, H.-M., Pittel, K., Renn, J., Rens, S. & Sauer, D. U. (2022). Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie? (Kurz erklärt!), Akademienprojekte "Energiesysteme der Zukunft" (ESYS).

Europäisches Parlament (2022). Proposal for a regulation of the european parliament and of the council establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products.

Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Oliveira Garcia, W. de, Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Del Mar Zamora Dominguez, M. & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 63002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

Goll, D. S., Ciais, P., Amann, T., Buermann, W., Chang, J., Eker, S., Hartmann, J., Janssens, I., Li, W., Obersteiner, M., Penuelas, J., Tanaka, K. & Vicca, S. (2021). Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nature Geoscience*, 14(8), 545–549. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>

Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F. & Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature communications*, 11(1), 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>

IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*.

IPCC. (2022). Annex I: Glossary. In IPCC (Hrsg.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

IPCC. (2024, 14. Mai). *FAQ Chapter 4*. <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-4/>

Krämer, D., Kaiser, S., Barascu-Wilde, A., Digulla, F.-E., Boumrifak, C., Bringezu, S. & Blaumeiser, D. (2022). Artificial photosynthesis - Technologies, obstacles, and potentials.

Pongratz, J., Geneuss, K., Hoppe, I. & Miller, M. (2024). CDR - weil Emissionsreduktion alleine nicht genügt, um die Klimaziele zu erreichen.

Prognos. (2021). *Technische CO₂-Senken: Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negative-missionstechnologien*. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.

Smith, S., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W., Powis, C., Bellamy, R. & Callaghan, M. (2023). *State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>