

## 2. KOHLENDIOXIDENTNAHME AUS DER ATMOSPHÄRE (Carbon Dioxid Removal, CDR – Negative Emissions-Technologien, NET)

Die Verfahren zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre (CDR) sind zentraler Teil des sogenannten Climate-Engineering. Sie alle wollen der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entziehen und dauerhaft in anderen Reservoiren speichern. Man nennt sie auch Negative Emissions-Technologien (NETs). Das der Atmosphäre entzogene CO<sub>2</sub> kann mehr oder weniger dauerhaft in Böden, der Erdkruste oder unter dem Ozean gespeichert, in Biomasse gebunden oder chemisch als Rohstoff in der Industrie genutzt werden (OSCHLIES et al. 2019). CDR wird sehr oft als Ergänzung zu der Reduktion der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgeschlagen, um die Ziele des völkerrechtlich verbindlichen Paris-Abkommens zu erreichen und in vielen Fällen auch als notwendig angesehen.

### 2.0 Übersicht der Maßnahmen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre

JOSÉ L. LOZAN & HARTMUT GRAßL

Im vorliegenden Kapitel wird eine Übersicht der wichtigsten CDR-Verfahren zusammengestellt. Bei diesen unterscheidet man oft marine und terrestrische Methoden. Wir differenzieren hier aber zwischen biologisch- und geo-chemisch-basierten CDR-Verfahren, weil die Akzeptanz der Verfahren davon stark abhängt.

#### Biologisch basierte CDR-Verfahren

Durch diese Methoden werden die vorhandenen natürlichen Speicher vor allem als pflanzliche Biomasse genutzt.

##### Aufforstung und Wiederaufforstung von Wäldern

Durch Aufforstung kann durch Photosynthese zusätzlich Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden werden. Neben dem Klimaschutz kann dadurch auch ein Beitrag zur Biodiversität geleistet werden, wenn standortgerechte Baumarten und nachhaltige, also naturnahe Bewirtschaftungsformen verwendet werden. Meist schließt man den Einsatz genmanipulierter Pflanzen und die Pflanzung nicht-standortgerechter Arten dabei aus (siehe Kap. 2.1.).

##### Renaturierung und Wiedervernässung der Moore

Sehr große Teile der Moore in Deutschland und Europa wurden trockengelegt und meist landwirtschaftlich genutzt. Aus den trockenen Mooren wird ständig CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> freigesetzt. Man schätzt die jährliche Emission in Deutschland auf über 50 Mio. t CO<sub>2</sub>-äq. Das sind etwa 7% der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Eine fachgerechte Wiedervernässung der Moore soll diese Emissionen stoppen und zusätzlich Kohlenstoff fixieren. Damit werden gleichzeitig die Bedingungen für das gesamte Ökosystem und die Biodiversität verbessert. Für ihre künftige Nutzung bietet sich auch die Paludikultur an. Das ist die landwirtschaftliche Nutzung von nassen oder wiedervernässten Moorböden z.B. zum Anbau von Schilf für Reetdächer und Torfmoos als Torfersatz (SUCCOW et al. 2021) (Weitere Details im Kap. 2.1.2).

##### Renaturierung und Aufforstung von Mangrove-Wäldern

Viele Mangrove Wälder wurden über Jahrzehnte durch verschiedene Aktivitäten beeinträchtigt und oft zerstört. Dabei gingen wichtige Lebensräume an der Küste und ihre Funktion als Küstenschutz verloren. Der Schutz und die Aufforstung (s. *Abb. auf der Titelseite, unten rechts*) bei möglichst großer Fläche dieser Ökosysteme werden als besonders günstige Maßnahmen zum Klimaschutz gefordert. Auch weil diese Küstenökosysteme zu den potentesten natürlichen Speichern von Kohlenstoff und Stickstoff gehören. Mangroven speichern in ihrer ober- und unterirdischen Biomasse bei starker Sedimentation große Mengen an organischem Material. Die relative Stabilität dieses organischen Materials unter oft anoxischen und salinen Bedingungen verhindert die Freisetzung der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub>. Die hohen Sedimentationsraten tragen gleichzeitig auch zur Stabilisierung von Küstenlinien und zum Schutz der Küsten vor Erosion und Sturmschäden bei (ZIMMER 2021, weitere Details im Kap. 2.1.3).

##### Renaturierung der Flussauen

Auen entlang der Flüsse und Bäche werden bei Hochwasser überschwemmt. Deutschlandweit waren das früher über 16.000 km<sup>2</sup> (4,5% der Fläche Deutschlands) (BfN 2021). Von entscheidender Bedeutung ist der Wechsel zwischen Trockenfallen und Überflutung, der zum Aufbau kohlenstoffreicher Sedimente führt. Auen gehören zu den produktivsten Flächen, deshalb werden knapp 70% der Auen landwirtschaftlich – 30% davon als Acker – genutzt, stehen also nicht mehr als Überschwemmungsflächen zur Verfügung.

Die geringfügige Renaturierung der Auen in den letzten Jahren ist bei weitem nicht ausreichend. Infolge der häufiger werdenden Hochwasserereignisse fehlen sie außerdem als Hochwasserschutz (s. Kap. 2.1.4).

### **Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch gentechnisch veränderte Pflanzen**

Mit gentechnisch veränderten Pflanzen soll mehr CO<sub>2</sub> in Biomasse umgewandelt werden. Diese Forschung wird mit der Ernährungssicherung einer weiter wachsenden Weltbevölkerung begründet und ist trotz ernsthafter Bedenken seit Jahren voll im Gange. Das Ziel ist die Erträge zu steigern sowie die Stickstoff- und Wassernutzungseffizienz zu erhöhen. Ferner soll die Anpassungsfähigkeit an heißere und trockenere Klimazonen verbessert werden. Damit soll mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gebunden werden (s. Kap. 2.1.5).

### **Düngung der Meere mit Eisen zur Verstärkung der Planktonproduktion**

Aufgrund der großen Fläche der Weltmeere wurde das Potenzial der Ozeandüngung zur Erhöhung der Aufnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zunächst als vielversprechend eingeschätzt. Durch Verstärkung der Biomasseproduktion des Phytoplanktons und dadurch erhöhten Absinkens abgestorbenen Materials (Detritus) sollte der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen werden. Dieser Vorgang wird auch als biologische Pumpe bezeichnet. Wegen des erwarteten hohen Potenzials wurde diese Climate-Engineering-Methode intensiv erforscht. Ab 1993 wurden 13 Freilandexperimente meist mit Eisen als Dünger durchgeführt. Ein nennenswerter Nettoexport von organischem Material in die Tiefe – die Grundvoraussetzung für einen CO<sub>2</sub>-Entzug – konnte in keinem Experiment nachgewiesen werden. Das meist gebildete Phytoplankton wurde schnell vom Zooplankton gefressen. Nach kurzer Zeit trat ein Mangel an anderen Nährstoffen auf. Die zugesetzten Eisenverbindungen verschwanden wahrscheinlich aufgrund von chemischen Prozessen schnell aus dem Oberflächenwasser (CBD 2009; THE ROYAL SOCIETY 2009).

Neben der Frage der Wirksamkeit der Methode sind verschiedene Risiken mit einer intensiven Ozeandüngung verbunden. Die Vielzahl ungeklärter Nebenwirkungen ist der Grund dafür, dass entsprechende Beschlüsse 2010 im Rahmen des globalen London-Übereinkommens gefasst wurden. Danach sollten künftige Experimente mit großer Sorgfalt durchgeführt und insbesondere die langfristigen potenziellen negativen Auswirkungen überwacht werden. Kommerzielle Eisendüngungsaktivitäten sind derzeit durch internationales Recht untersagt (LEUJAK et al. 2011) (s. Kap. 2.1.6)

### **Produktion von Mikroalgen**

Eine weitere Möglichkeit, CO<sub>2</sub> günstig und in großer Menge aus der Luft zu entziehen, ist die Vermehrung von Mikroalgen in künstlich angelegten Teichen z.B. an der Küste mit Meereswasser. Durch diese naturbasierte Methode ist die CO<sub>2</sub>-Abscheidung effizienter als die Landpflanzen inkl. Regenwälder. Pro Flächeneinheit binden Mikroalgen bis zu 10-30 Mal mehr Kohlenstoff pro Jahr als Regenwäldern. Mikroalgen vermehren sich in kürzerer Zeit und damit wachsen ein 8- bis 10mal schneller (s. Kap. 3.2), was dementsprechend zu einer starken Biomassezunahme führt. Diese Entwicklung kann durch Erwärmung und Zufuhr von CO<sub>2</sub> noch optimiert werden.

Die geernteten Algen können als Nahrungsquelle für Mensch und Tier genutzt werden. Ferner lässt sich aus der Algen-Biomasse künstliche Kraftstoffe (BtL) herstellen (Kap. 3.4). Man kann sie auch für die BECCS-Technologie verwenden; dabei wird sie zur Energieerzeugung verbrannt und das dabei entstandene CO<sub>2</sub> eingefangen und langfristig unterirdisch gespeichert (Kap. 2.2.2 und .3).

### **Kohlenstoffspeicherung durch Seegras- und Salzwiesen**

Seegraswiesen und Salzwiesen sind große und wichtige Küstenökosysteme. Neben ihren zahlreichen ökologisch bedeutsamen Funktionen sind sie zudem wichtige Kohlenstoffspeicher. Seegräser und Salzwiesen nehmen CO<sub>2</sub> und andere Formen von anorganischem Kohlenstoff aus dem Wasser und der Luft auf und sie können den Kohlenstoff dauerhaft in den tieferen, sauerstoffarmen Schichten des Wattbodens und der Salzwiese speichern. Bakterien, die organisches Material zersetzen und so den Kohlenstoff wieder freisetzen, können aufgrund des Sauerstoffmangels dort kaum aktiv sein, wodurch kohlenstoffreiche Sedimente im Laufe der Zeit angereichert werden. Seegras- und Salzwiesen können so sehr effizient dem Klimawandel entgegenwirken. Gleichzeitig sind Seegrasbestände und Salzwiesen durch die Effekte des Klimawandels direkt bedroht. Hitzewellen, starke Hydrodynamiken sowie damit verbundene Erosion und Sedimentumlagerung können ihre Ausdehnung und ökologischen Funktionen stark beeinträchtigen. Diese Gefahr ist gegenwärtig besonders infolge des Meeresspiegelanstiegs und der Zunahme der Erosion an der Küste (weitere Details in Kap. 2.1.9).

### **Geochemisch & technisch basierte Verfahren**

#### **Direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft und Speicherung (Direkt Air Carbon Capture & Storage, DACCS)**

Es gibt Verfahren, mit denen CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft an Feststoffen gebunden werden kann. Solche

Anlagen werden »künstliche Bäume« genannt. Neben der Firma Climeworks arbeiten Carbon Engineering in Kanada, Global Thermostat in den USA und Skytree in den Niederlanden an solchen Verfahren. Skytree ist ein Ableger der Europäischen Raumfahrtagentur ESA. Ihre Geräte beruhen auf dem Verfahren, mit dem CO<sub>2</sub> aus der Atemluft der Internationalen Raumstation gefiltert wird. Diese Anlagen können überall großflächig z.B. entlang von Straßen gestellt werden. Anschließend kann das CO<sub>2</sub> unterirdisch gelagert oder als Rohstoff in der Industrie, z.B. in Form von Karbonaten, genutzt werden. Da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft (0,04%) etwa 300x geringer als im Rauchgas eines Kraftwerks ist, sind die Kosten aufgrund des energetischen Aufwands viel höher als bei den Abscheide-Methoden in Kraftwerken.

Der Betrieb der Anlagen lohnt sich meist in Regionen mit kostengünstiger Energie. So betreibt Climeworks das Projekt ORCA auf Island, wo reichlich geothermische Energie zur Verfügung steht. Besonders energieintensiv ist die Trennung des CO<sub>2</sub> von den Filtern. Durch die Nähe etwa zu einem Untergrundspeicher könnten Kosten für den Transport gespart werden. Weiterer Vorteil gegenüber den *Carbon Capture and Storage* (CCS)-Methoden (s.u.) ist, dass die Umgebungsluft im Unterschied zu Abgasströmen in Kraftwerken relativ unbelastet von Schadstoffen ist, die bei der Filterung zusätzliche Probleme verursachen.

Diese Methode setzt eine große Anzahl von Anlagen voraus, da die einzelne Anlage nur geringe Mengen CO<sub>2</sub> bindet. Dies bedingt demzufolge einen enormen logistischen Aufwand. Nicht zuletzt ist – ähnlich wie bei CCS – dieser Ansatz begrenzt durch die Kapazitäten verfügbarer Speicher für CO<sub>2</sub>. DAC benötigt 1400 bis 2500 kWh an erneuerbarer Energie um 1 t CO<sub>2</sub> aus der Luft mit einem aktuellen Kosten zwischen 120-800 EUR zu gewinnen (Hess et al. 2020). Die Autoren gehen mit einer Senkung der Kosten bis 2050 auf 41-82 EUR/t aufgrund der schnellen technischen Entwicklung aus (siehe Kap 2.2.1).

### **Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage, CCS)**

Für den Klimaschutz wäre es effizienter, das produzierte CO<sub>2</sub> in energieintensiven Industrien und Betrieben wie Stahl- und Zementproduktion sowie Kohlekraftwerken gleich aus dem Rauchgas abzuscheiden und dauerhaft unterirdisch zu speichern, als wenn es freigesetzt und dann z.B. durch Aufforstung wieder aus der Atmosphäre entzogen wird. Der Einsatz von CCS ist stark von der Verfügbarkeit geeigneter Speicher abhängig. In Norwegen wird CCS seit Jahren angewandt und viel Geld in die Ausweitung investiert. Dementsprechend werden

geologische Erkundungen durchgeführt um weitere geeignete Speicher zu finden. CCS ist strenggenommen keine Climate-Engineering-Methode, da man damit die Emission von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre von vornherein vermeidet. Bei der Suche nach geeigneten Stellen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung müssen Gebiete, die z.B. zur Gewinnung von Rohstoffen und geothermischer Wärme sowie Stromerzeugung dienen, unberührt bleiben. Auch eine Kontamination des Grundwassers z.B. mit salzhaltigem Wasser darf nicht eintreten. Das geplante Gesetz zu CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung muss beachtet werden (s. Kap. 2.2.2).

### **Nutzung von Biomasse als Energie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS, Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)**

Alternativ zu der o.g. beschriebenen Methode zur Tiefsee-Versenkung von Biomasse zur Verzögerung der Zersetzung gibt es den Vorschlag, Biomasse energetisch zu nutzen und anschließend das frei werdende CO<sub>2</sub> abzuscheiden und unterirdisch zu speichern. Bei dieser als BECCS bezeichneten Methode geht es um eine Kombination der Nutzung von Bioenergie (BE) mit der CCS-Methode (s.oben). Biomasse wird schon weltweit zur Energiegewinnung genutzt. Es ist daher sinnvoll beide Methoden zu verbinden und in großen Anlagen anzuwenden, da die CCS-Technologie hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen voraussetzt. In Frage kommen große Betriebe wie Bioethanolraffinerien und Papiermühlen. In solchen Betrieben steht die Biomasse zur Verfügung, so dass Energie für den Transport gespart wird. Die energetischen Kosten entstehen nur bei der Abscheidung, dem Transport und der Speicherung des CO<sub>2</sub>. Die Möglichkeit einer guten CO<sub>2</sub>-Bilanz ist gegeben. Der limitierende Faktor wäre die Speicherkapazität für CO<sub>2</sub> und die Konkurrenz von Bioenergie u.a. zur Nahrungsmittelproduktion (s. Kap. 2.2.3).

### **Produktion und Einsatz von Pflanzenkohlen aus Biomasse (Biokohlen oder BioChar)**

Pflanzen entziehen der Atmosphäre große CO<sub>2</sub>-Menge und wandeln sie während der Photosynthese in organisches Material um. Wenn die Pflanzen absterben, sich zersetzen oder verbrannt werden, wird das organische Material wieder als CO<sub>2</sub> freigesetzt. Das Ziel der als »Biokohle« bezeichnete Climate-Engineering-Methode ist, das produzierte organische Material in den Pflanzen selbst zu speichern. Zunächst wird dabei die pflanzliche Biomasse in »Biokohle« umgewandelt. Dafür gibt es zwei Verfahren: a) Durch Pyrolyse: das organische Material wird bei niedriger Sauerstoffkonzentration erhitzt. Eine teilweise Zersetzung findet statt. Dabei entstehen auch Öle und Gase als Nebenprodukte,

die als Biokraftstoffe verwendbar sind. b) Ein alternatives Verfahren ist die Anwendung der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC). Dabei wird die Biomasse unter hohem Druck in Wasser erhitzt und auf diese Weise verkohlt. In Abhängigkeit von dem verwendeten Material wird durch Pyrolyse bis zur 50% und durch HTC bis zur ca. 75% des enthaltenen Kohlenstoffs in »Biokohle« umgewandelt.

Man kann »Biokohle« in zwei Formen anwenden: a) Biokohle wird mit natürlichen, ertragsarmen Böden vermischt. Die Zersetzung der »Biokohle« soll im Boden mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern. Diese Technik beruht auf dem historischen Beispiel der Bildung von *Terra Preta* in Amazonien, die wahrscheinlich aus Holzkohle entstanden ist. Bei dieser Anwendung wird die Bodenqualität verbessert und die Erträge nehmen zu. b) Biokohle kann auch direkt zur Energiegewinnung genutzt werden. Über die direkte Verwendung als Energieträger sind nur wenige gesicherten Erkenntnisse bekannt. Man kann daher nicht sagen, welche Nutzung effektiver ist.

Als Ausgangsmaterial können Anbaubiomasse, Grünschnitt, Stadt-, Landwirtschafts- oder Forstabfälle sowie Abfälle aus der Papierindustrie oder ungenutzte Pflanzenteile aus der Nahrungsmittelproduktion verwendet werden. Weitere Details über Biokohle werden im Kap. 2.2.4 gegeben.

### Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden

Die Humusgehalte in den Oberböden im gemäßigten Klima unter Acker- und Grünlandnutzung unterscheiden sich deutlich. Die meisten Ackerböden weisen nur 2–<4%, aber die Grünlandböden (Weiden und Wiesen) 4 bis <8% Humus auf. Die Humusgehalte in Böden sind auch stark von der Bodenart (z.B. Korngrößenverteilung) und der Landnutzung abhängig. Im Mittel findet man etwa 2/3 des organischen Kohlenstoffs im Oberboden (0–30 cm) und 1/3 im Unterboden (30–100 cm). Auch mineralische Oberböden sind meist kohlenstoffreicher als Unterböden, denn sie erhalten mehr Wurzeln, Erntereste und organischen Dünger. Für die langfristige Kohlenstoffspeicherung sind aber Unterböden bedeutsamer, da in ihnen die Umsätze geringer sind. Eine besondere Bedeutung haben Moore und moorähnliche Böden, die in Deutschland etwa 6% der Landwirtschaftsfläche ausmachen. Ihr Vorrat an organischem Kohlenstoff beträgt ein Vielfaches der Kohlenstoffspeicherung in Mineralböden. Je nach landwirtschaftlicher Praxis kann nicht nur auf Grünland, sondern auch auf Äckern eine Anreicherung organischen Kohlenstoffs erreicht werden (weitere Details in Kap. 2.2.5).

### Kohlendioxidaufnahme durch Wüsten-Böden

Böden – die dünne oberste Schicht der Erdkruste – enthalten mehr Kohlenstoff als die Biosphäre und Atmosphäre zusammen und sie könnten bei entsprechenden bekannten Maßnahmen noch mehr aufnehmen. Die Humus-Menge im Boden spielt dabei eine sehr wichtige Rolle. Nur in den sehr trockenen Regionen (Halbwüsten und Wüsten) ist der Humusgehalt sehr gering. Weltweit gibt es bis zu 1 Milliarde Hektar küstennahe Wüsten, die für eine »Begrünung« zur Verfügung stehen. Diese Gebiete nehmen aufgrund einer Verstärkung der Wüstenbildung, des Klimawandels und falscher Landnutzung sogar zu. Es besteht ein großes Potenzial bei der Nutzung dieser Landschaften zur Kohlenstoffbindung durch die Einführung von Plantagen mit sehr wenig Wasser benötigenden Sträuchern (s. BRANCH & WULFMEYER 2021). Mit der heutigen Technik zur Entsalzung, Bewässerung, und Bioenergienutzung kann das Potenzial dieser Fläche als CO<sub>2</sub>-Senke genutzt werden (s. untere Abb. 1). Man schätzt, dass so bis zu 25 Mio. t CO<sub>2</sub> je 10.000 km<sup>2</sup> gespeichert werden könnten (s.Kap. 7.8 im Warnsignal Klima: Boden und Landnutzung).

### Bedeutung von Grasland als Kohlenstoffspeicher

Betrachtet man den C-Gehalt der Böden, dann erkennt man die überragende Bedeutung der Moorböden und anderen Feuchtgebiete; sie enthalten bis zu zehnmal mehr Kohlenstoff als andere Böden. Am zweiten Stelle findet man aber mit großem Abstand Grünland (Weiden und Wiesen). Aufgrund des relativ hohen C-Gehalts liefern Grünlandböden viele unterschiedliche Ökosystemleistungen wie Kohlenstoff- und Wasserspeicher sowie Biodiversität und Erosionsschutz. Wenn es um eine hochskalierte Renaturierung degradierten Lebensräume geht, soll in terrestrischen Lebensräumen nach

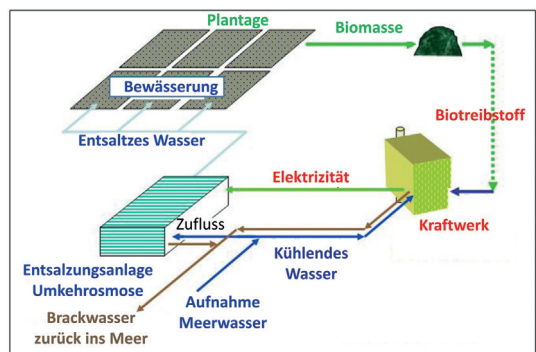


Abb. 1: Darstellung der Infrastruktur von der Entsalzungsanlage bis zur Bewässerung der Plantage mit dem Ziel, die Wüste zu begrünen. Die Humusbildung und damit die Kohlenstoffbindung wird erhöht. Plantagensystemen wird mit sehr wassersparenden Sträuchern wie Jojoba und Jatropha eingeführt (aus BRANCH & WULFMEYER 2021).

den Mooren und Feuchtwiesen das Grünland stehen. In der Regel werden die Wälder durch Forstung und Wiederaufforstung bevorzugt. Ferner weist das Grünland eine hellere Oberfläche und damit eine höhere Albedo als Wälder auf, was zu einer stärkeren Abgühlung führt (s. Kap. 2.2.7).

### **Beschleunigte Verwitterung an Land**

Unter üblichen Bedingungen werden Silikate an der Erdoberfläche unter Einwirkung von Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) zum Teil gelöst. Dabei wird das aus der Luft stammende  $\text{CO}_2$  in Kalziumkarbonat ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) gebunden. Dieser Prozess wird als Verwitterung (Weathering) bezeichnet. Er läuft in der Natur jedoch sehr langsam ab; man schätzt, dass nur 0,1 Gt C/Jahr so gebunden wird. Um diesen Prozess zu beschleunigen, muss eine große Menge stark basischer Gesteine wie Olivin, Dunit oder Basalt (s. untere *Abb. 2*) zu Gesteinsmehl gemahlen werden. Eine Möglichkeit wäre, das Gesteinsmehl in landwirtschaftliche Böden einzubringen. Weitere Details sind im Kap. 2.2.8 enthalten.

### **Alkalinisierung des Ozeans**

Alkalines Gesteinsmehl kann auch ins Meer auf großer Fläche eingebracht werden. Eine Möglichkeit wäre, es an Strände zu deponieren und von dort durch die Wellen einspülen zu lassen. Eine weitere kostengünstige Methode wäre das Gesteinsmehl mithilfe von Transportschiffen ins Meer einzubringen. Die Verwitterung des Gesteinsmehls würde zu einer Erhöhung des Karbonatgehalts führen und gleichzeitig den pH-Wert etwas erhöhen. Man bezeichnet diese Methode auch als künstliche Alkalinisierung der Meere. Durch diesen Prozess erhofft man eine verbesserte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Meere und eine verlangsamte Ozeanversauerung zu erreichen. Die Modellergebnisse zeigen, dass das Einbringen des Verwitterungsmaterials in relativ geringen Mengen nur wenige Auswirkungen auf die Aufnahme vom  $\text{CO}_2$  aus der Luft hat. Erst wenn die Verwitterung

gegenüber den natürlichen Bedingungen um etwa das Zweihundertfache erhöht wird, lässt sich ein deutlicher Effekt erkennen. Insgesamt sind die Auswirkungen einer beschleunigten Verwitterung im Meer auf biochemische Prozesse und die marine Nahrungskette noch wenig bekannt (s. Kap. 2.2.9).

### **Verstärkung der Auftriebsgebiete**

In den meisten Meeresgebieten liegen Schichten wärmeren Wassers über Schichten mit kaltem und nährstoffreichem Tiefenwasser auf. Sie sind also stabil geschichtet und werden kaum durchmischt. Das Ziel dieser Methode ist das Tiefenwasser nach oben zu befördern, um die Biomasseproduktion an der Oberfläche zu steigern. LOVELOCK & RAPLEY (2007) schlugen den Einsatz von vertikalen Pumpen vor. 100-200 m lange vertikale Röhren mit 10 m Durchmesser sollten mit Hilfe von Wellenenergie das Wasser aus der Tiefe nach oben fördern. Verschiedene Prototypen wurden bereits ([www.atmocean.com](http://www.atmocean.com)) getestet. Ein Nachteil ist, dass das Tiefenwasser oft viel Kohlenstoffverbindungen enthält und daher kaum mehr  $\text{CO}_2$  aufnehmen kann oder sogar  $\text{CO}_2$  an die Atmosphäre freigesetzt wird (SHEPPERD et al. 2007).

Um die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Meeres um nur 1 GtC/Jahr zu erhöhen, wäre der Einsatz einer sehr großen Anzahl von Pumpen erforderlich und der Aufwand wäre zu groß (YOOL et al. 2009, LAMPITT et al. 2008). Ferner wäre eine Beeinträchtigung für Fischerei, Schifffahrt und andere Meeresnutzungen aufgrund der Hindernisse nicht unbeträchtlich (weitere Details s. Kap. 2.2.6).

### **Versenkung von Ernteabfällen in die Tiefsee**

Bei dieser als CROPS (*Crop Residue Permanent Sequestration*) bezeichneten Methode gehen STRAND & BENFORD (2009) davon aus, dass etwa ein Drittel der Ernteabfälle für die Versenkung ohne ökologische Beeinträchtigung verwendet werden können. Die luftdicht verschlossenen Abfälle sollen mithilfe von Schiffen nach Beschwerden mit Steinen in die Tiefsee versenkt werden. Die Autoren nehmen an, dass in dieser Tiefe bei niedrigen Temperaturen und Sauerstoffarmut eine Zersetzung des organischen Materials nur sehr langsam stattfinden kann. Kohlenstoff kann dort bis zu tausenden von Jahren gespeichert bleiben. STRAND & BENFORD schätzen die Kosten auf 340 US\$ je t C. Nach ihrer Meinung könnten so jährlich 0,6-0,9 Gt  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre entfernt werden. STRAND & BENFORD (2009) beschreiben auch, wie die möglichen ökologischen Auswirkungen minimiert werden können. Laut THE ROYAL SOCIETY (2009) ist die Idee weder energetisch noch wirtschaftlich tragbar. Auch wichtige Nährstoffe würden aus dem natürlichen Kreislauf entfernt.



**Abb. 2:** Basaltfelse - Beispiel für basisches ( $\text{SiO}_2$ -armes) Gestein auf Island. Foto: M. Leunig August 2019.

**Sargassum: "Goldener Regenwald im Atlantik"**

Jedes Jahr entwickelt sich die Braunalge Sargassum massiv im tropischen Atlantik von Westafrika bis zur Karibik mit einer Biomasse von ca. 20 Mio. t. Man nennt diesen Bereich der Große Atlantische Sargassum-Gürtel (GASB). Getrieben durch Strömungen und Wind bilden sich große Sargassum-Matten mit einer Fläche von mehreren Quadratkilometern und einer Dicke zwischen 10 cm und 2 m. Diese Matten werden als »goldener Regenwald« bezeichnet. Sargassum vermehrt sich schnell und hat ein hohes C:N-Verhältnis von 33 und dadurch ein bedeutendes Potenzial CO<sub>2</sub> zu binden. Diese Braunalgen verursachen im Küstenbereich viele Probleme für das Küstenökosystem. Nach ihrer Zersetzung wird das gebundene CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt. In Anlehnung an STRAND & BENFORD (2009) gibt es den Vorschlag, die Algen evtl. getrocknet in luftdicht verschlossenen Ballen und beschwerdet mit Steinen in die Tiefsee zu versenken. Aufgrund des dortigen niedrigen Sauerstoffs und der geringen Temperaturen läuft der bakterielle Abbau sehr langsam ab. Dadurch kann das gebundene CO<sub>2</sub> mehrere Jahrhunderte dort bleiben. Optimistische Schätzungen gehen von einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung von rund 1 Gt/Jahr. Die Gefahr, dass wichtige Nähr- und Spurenstoffe den Böden entzogen werden, was der Fall beim Versenken von Landpflanzen wäre, besteht nicht. Die Freisetzung des CO<sub>2</sub> beim Transport der Algen zur Versenkungsstelle dürfte verhältnismäßig gering sein. Um negative Auswirkungen in der fragilen Tiefsee in Grenzen zu halten, müsste man jedoch entsprechende Maßnahmen treffen (s. Kap. 2.1.8).

**Atmosphärisches CO<sub>2</sub>-Entziehen durch mehr Meeresschnee**

Meeresschnee besteht aus Ausscheidungen von Planktonorganismen, den so genannten Exsudaten, aus Exkrementen und auch aus toten Zellen, die zu weißlich-schleimigen Partikeln verkleben. Dieses natürliche Phänomen soll durch Zugabe von Eisen, das in einem organischen Chelat gebunden ist, verstärkt werden. Die Erprobung dieses Verfahrens ist noch in der Planung (NEUBERT 2022).

**Literatur**

BFN (2021): Auenzustandsbericht 2021 - Flussauen in Deutschland. DOI 10.19217/brs211. 71 Seiten.  
BRANCH, O. & V. WULFMEYER (2021): Kohlenstoffspeicherung und regionales Climate Engineering in Trockengebieten durch bewässerte Plantagen. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL & D. KASANG (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 368-373. Wissenschaftliche Auswertungen in

Kooperation mit GEO, Hamburg. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.5.  
CBD (2009): Scientific synthesis of the impact of ocean fertilization on marine biodiversity. Montreal, Technical Series No. 45, 53 S.  
HESS, D., M. KLUMPP & R. DITTMAYER (2020): Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien. Studie im Auftrag des Ministerium für Verkehr. Baden-Württemberg.  
KELEMEN, P. B. & J. MATTER (2008): In situ mineral carbonation in peridotite for CO<sub>2</sub> storage. Proceedings of the National Academy of Sciences. Band 105, S. 17295-17300.  
LAMPITT, R. S., E. P. ACHTERBERG, T. R. ANDERSON, J. HUGHES et al. (2008): Ocean fertilization: a potential means of Geo-Engineering? Philosophical Transactions of the Royal Society A, Band 366, S. 3919-3945.  
LOVELOCK, J. E. & C. G. RAPPLEY (2007): Ocean pipes could help the earth to cure itself. Nature, Band 449, S. 403.  
LEUJAK, W., H. GINZKY & U. CLAUSSEN (2011): Eisendüngung – Mehr CO<sub>2</sub> Fixierung durch das Meer? Warnsignal Klima: Die Meere, 348-353.  
NEUBERT, H.-J. (2022): CO<sub>2</sub> im Ozean versenken mit Meeresschnee. <https://www.heise.de/hintergrund/CO-versenken-mit-Meeresschnee-6586274.html?view=print>  
OSCHLIES, A. et al. (2019): Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte. Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689). 72 S.  
THE ROYAL SOCIETY – J. SHEPHARD, K. CALDEIRA, P. COX et al. (2009): Geo-Engineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty. London, 83 S.  
SHEPHARD, J. G., D. IGLESIAS-RODRIGUEZ & A. YOOL (2007): Geo-engineering might cause, not cure, problems. Nature, Band 449, S. 781.  
STRAND, S. E. & G. BENFORD (2009): Ocean sequestration of crop residue carbon: recycling fossil fuel carbon back to deep sediments. Environmental Science and Technology. Band 43, Ausgabe 4, S. 1000-1006.  
STREFLER, J. T. AMANN, N. BAUER, E. KRIEGLER & J. HARTMANN (2018): Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. Environmental Research Letters, doi:10.1088/1748-9326/aaa9c4.  
SUCCOW, M., G. GAUDIG & F. TANNEBERGER (2021): Die Vernutzung der Moore Deutschlands und ihre klimatischen Folgen. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL & D. KASANG (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 125-135. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.17.  
UBA (2011): Geo-Engineering: Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Methoden - Rechtliche Rahmenbedingungen - Umweltpolitische Forderungen. 48 S.  
YOOL, A., J. G. SHEPERD, H. L. BRYDEN & A. OSCHLIES (2009): Low efficiency of nutrient translocation for enhancing oceanic uptake of carbon dioxide. Journal of Geophysical Research, Band 114, doi: 10.1029/2008JC004837.  
ZIMMER, M. (2021): Der Schutz von Mangroven und Küstenvegetation wirkt dem Klimawandel entgegen. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL & D. KASANG (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 363-367. Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg. www.warnsignal-klima.de, doi:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.50.

**Kontakt:**

Dr. José L. Lozán  
Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg  
jl-lozan@i-online.de  
Prof. Dr. Hartmut Graßl  
Max Planck Institut für Meteorologie (Hamburg)  
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Lozán, J. L. & H. Graßl (2023): Übersicht der Maßnahmen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR). In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). Warnsignal Klima. S. 43-48. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.06