

UMWELTMEDIZIN

Tausend Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid zu viel in der Atmosphäre

Teil 2: Kohlendioxid biologisch und chemisch binden

Michael Trapp, Berlin

Um unbeherrschbare Klimawandelfolgen zu verhindern, müssen in diesem Jahrhundert bis zu 1000 Gt Kohlendioxid [8, 30, 31] (1000 Gigatonnen [Gt] = Tausend Milliarden Tonnen) dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt werden, d. h. konzentriertes CO₂ muss gelagert oder gebunden werden. Gleichzeitig müssen so schnell wie möglich die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) minimiert und die technisch nicht vermeidbaren Emissionen entsorgt werden, bevor diese in die Atmosphäre gelangen.¹ Die Atmosphäre hat möglicherweise seit 20 Millionen Jahren [40] keine so hohe CO₂-Konzentration aufgewiesen wie derzeit, und für den Ausgleich relativ kleiner Schwankungen (200–300 ppm) haben die Erdsysteme viele tausend Jahre gebraucht. Das heißt wir müssen das in der Atmosphäre überschüssige CO₂ über sehr lange Zeiträume speichern. Dann sollten die Negativ-Emissions-Maßnahmen (NE-Maßnahmen) in permanente (z. B. CO₂-Versteinerung; Mineralien bleiben für Millionen Jahre in der Erdkruste) und temporäre (z. B. Aufforstung; Holz unterliegt einem Kohlenstoffkreislauf) eingeteilt werden.

Atmosphärische CO₂-Konzentration steigt weiter massiv an

Die gegenwärtige CO₂-Emission (CO₂ macht ca. zwei Drittel aller THGs aus) betrug 2021 ca. 37 Gt. Angenommen, bis zur globalen „Klimaneutralität“ in 2050 würde die atmosphärische CO₂-Konzentration um 2 ppm pro Jahr weiter ansteigen, müssten weitere 453 Gt entsorgt werden

(1 ppm = 7,81 Gt CO₂). Ein weiterer Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration ist wahrscheinlich, denn die Staatengemeinschaft wird versuchen, Krisen zu vermeiden, und mehrere Dekaden benötigen, um die „Klimaneutralität“ zu erreichen:

- Fossil fördernde und nutzende Volkswirtschaften benötigen mehrere Jahre oder sogar Dekaden, um die Transformation zur Klimaneutralität zu vollziehen.

- Geopolitische Krisen, Spaltung der Gesellschaft, Extremismus, Pandemien, Finanzkrisen u. a. verzerren Prioritäten und können Entscheidungen zum Klimaschutz verzögern.
- Rebound-Effekte, Produkt-Lebenszyklen und Anlagen sowie relevante Technologien, die noch in den Kinderschuhen stecken, bedingen weitere Emissionen für mehrere Jahre.

Was sind CO₂-Senken?

Als Kohlenstoff- oder CO₂-Senke bezeichnet man natürliche Ökosysteme oder geologische Formationen, die netto mehr CO₂ aufnehmen als abgeben und in unterschiedlichem Tempo über längere Zeiträume in die Atmosphäre wieder zurückführen (z. B. Wälder, Böden, Moore, Ozeane, Pflanzen, bestimmte Gesteinsarten).

Die Verweildauer des Kohlenstoffs in biologischen Systemen (Biosphäre, Hydrosphäre) ist wesentlich kürzer als in geologischen (Lithosphäre), wo sie u. a. in Form von Karbonat-Gestein, Kohle oder Erdöl hunderte Millionen Jahre betragen kann.

Für die **biologische Speicherung** werden CO₂-Senken (siehe Infokasten) in der Biosphäre und Hydrosphäre, für die **chemische Speicherung** geologische Formationen in der Lithosphäre genutzt. Im Folgenden wird auf den Schutz und die Wiederherstellung von CO₂-Senken durch Wieder-/Aufforstung, Verwendung von Pflanzenkohle, Moorrenaturierung, Seegraspflanzungen und auf die Beschleunigung geochemischer Prozesse (CO₂-Mineralisierung) eingegangen. Der Schutz der Biodiversität durch biologische Speicherung, der ebenfalls für uns überlebenswichtig ist, wird hier nicht näher betrachtet.

¹ Das Projekt der VW AG „Von der Wiege bis zur Bahre“ [19] zeigt beispielhaft, wie viel Restemission während des Lebenszyklus eines Produkts anfallen könnte.

Jede großtechnische Beeinflussung von CO₂-Senken hat mehr oder weniger komplexe Auswirkungen auf ökologische Gleichgewichte. Negativ-Emissions-Maßnahmen (NE-Maßnahmen) müssen deshalb weitsichtig, ganzheitlich und mit größtmöglicher Datenbasis getroffen werden. Neben Prozessoptimierungen mangelt es bisher noch an Daten zur prozessbedingten Emission (wieviel CO₂ wird pro Tonne CO₂-Speicherung emittiert) sowie an Energie- und Kosten-Bilanzen unter Berücksichtigung der Entzugsdauer. Auch die Schwächung der CO₂-Senken durch den Klimawandel (Waldbrände, Ausbreitung von ozeanischen Todeszonen, Expansion der Wüsten, etc.) oder durch den Menschen (Stickstoffeintrag, Abholzung, Flächenverbrauch, etc.) ist eine nicht quantifizierbare Größe.

In der Übergangsphase werden wir alle Maßnahmen zur NE benötigen, also auch solche, die CO₂ nur wenige Jahre oder Jahrhunderte speichern. Letztendlich brauchen wir aber CO₂-Entsorgungskonzepte, die mehrere hundert Gt CO₂ in wenigen Dekaden dauerhaft speichern.

Wie sich die Erdsysteme während und nach der Atmosphärensanierung verhalten könnten, wird in Fachkreisen diskutiert.

Wälder als Kohlenstoffspeicher

Die Wälder sind einer der großen Kohlenstoffspeicher an Land und als Bewahrer der Biodiversität unverzichtbar. Für die längerfristige CO₂-Speicherung sind sie allerdings nur von Nutzen, wenn das gebundene CO₂ ihrer Biomasse durch den natürlichen biologischen Abbau oder die Holzwirtschaft nicht in einem höheren Ausmaß wieder in die Atmosphäre

zurückgelangt als gleichzeitig die verbleibenden Waldbestände CO₂ durch den Biomassezuwachs binden.

Geschätzt wird, dass im Kohlenstoffhaushalt der Erde die Pflanzen nach ihrem Tod so viel CO₂ freisetzen, dass in der Gesamtbilanz nur 7–11 Gt CO₂ längerfristig jährlich gespeichert werden. Durch Wieder-/Aufforstung könnten 0,5–3,6 Gt CO₂ pro Jahr zusätzlich gebunden werden [28].

Die Senkenleistung eines Waldes erlahmt in dessen natürlichem Lebenslauf trotz unterschiedlicher Bewirtschaftung in einigen Jahrzehnten [6] und kann je nach Ausgangssituation, der Art der Bewirtschaftung zur CO₂-Quelle werden [23].

Die Wieder-/Aufforstung ist eine erfolgreiche Maßnahme im Portfolio der NE-Maßnahmen, wenn es gelingt, Baumarten zu nutzen, die mit den Klimawandelfolgen, den steigenden Temperaturen, häufigen Trockenperioden, Waldbränden, dem Schädlingsbefall und den intensiver werdenden Stürmen zurechtkommen. Die Berechnungen werden besonders durch die spezifischen, von der jeweiligen Baumart abhängigen CO₂-Absorptionsraten erschwert. Standortspezifische Merkmale spielen eine wesentliche Rolle: Nordische Wälder weisen eine wesentlich größere Biomasse unter der Erde auf (Wurzelwerk, Pilzgeflecht) als Wälder in Äquatornähe. Tropenwälder wachsen schneller, können also kurzfristig mehr CO₂ binden. Land-, Bau- und Energiewirtschaft haben ebenfalls zunehmenden Flächenbedarf und dürften der künftigen Aufforstung Grenzen setzen. Wie eine 30 Jahre dauernde, 2020 publizierte Studie zeigt, nimmt die Fähigkeit tropischer Wälder, CO₂ zu absorbieren, aufgrund klimatischer Veränderungen



und Entwaldung ab. So wird der Amazonas-Regenwald wahrscheinlich bis Mitte der 2030er Jahre aus einer CO₂-Senke zu einer CO₂-Quelle werden [20].

Der Wald ist ein offener Kreislauf. Wieder-/Aufforstung würde CO₂ für Dekaden speichern, wenn wir den Bäumen erfolgreich helfen, sich den wandernden Klimazonen anzupassen. In Ausnahmefällen, wie z.B. beim Mammutbaum, wäre die Speicherung sogar für >1000 Jahre möglich. In der Bilanz der Wieder-/Aufforstung darf aber die indirekte Wirkung durch die stoffliche und energetische Substitution nicht vergessen werden. Ersetzt Holz THG emittierende Produkte oder Materialien, wie Beton, Metall, Kohle oder Erdöl, und werden mittels langlebiger Holzprodukte [2] zusätzliche Kohlenstoffspeicher außerhalb des Waldes aufgebaut, trägt dies mit dazu bei, dass weniger CO₂ rückgelagert werden muss.

Unabhängig vom Beitrag zur NE bleibt die Wieder-/Aufforstung für den Erhalt der Biodiversität Priorität auf der Klimaschutz-Agenda. Zahlreiche Initiativen weltweit leisten wertvolle Beiträge zum Schutz und zur Wiederaufforstung der Wälder, die sogar wissenschaftlich begleitet werden. Dazu gehört z.B. die gemeinnützige UG *Deutschland Forstet*

Auf [5], die Unternehmen mit regionalen Forstwirten und Waldbesitzenden vernetzt, um gemeinsam klimastabile Mischwälder zu schaffen.

Pflanzenkohle als Kohlenstoffspeicher

Wird biologische Masse in Pflanzenkohle verwandelt (Pyrolyse) und mit Teer oder Beton vermischt, und diese dann für Bauelemente, Gebrauchsgüter oder für die Landwirtschaft genutzt, kann dies dazu beitragen, CO₂ für Dekaden, Jahrhunderte und in einem Fall sogar für noch längere Zeiträume zu binden. Pflanzenkohle ist zwar nur ein kleiner Beitrag zur Atmosphärenentlastung, denn die pyrolysierte Biomasse ist begrenzt, hat aber wesentliche Vorteile: Sie ist permanent nutzbar, kann aus jedem biologischen Material gewonnen werden und ersetzt in vielen Fällen erdölbasierte Produkte sowie die energieintensive Produktion einiger Metalle.

Was ist Pflanzenkohle?

Die Begriffe Pflanzenkohle, Biokohle, biochar, Terra preta oder „hydrothermale Karbonisierung“ werden oft (fälschlicherweise) synonym benutzt, da es noch keine allgemein gültige Definition gibt.

Zur Gewinnung von Pflanzenkohle werden organische Stoffe durch Pyrolyse (380–1000°C unter stark reduziertem Sauerstoffgehalt) oder Hydrothermale Karbonisierung (ca. 200°C und 20 bar) zersetzt. Ausgangsstoffe können Holz, Blätter, Fäkalien, Algen, jede Form biologischen Abfalls sein.

Auch die Verwendung von Pflanzenkohle könnte kurzfristig ein wichtiger Baustein

im Portfolio der NE-Technologien werden, wenn die Akteurinnen und Akteure in Industrie und Landwirtschaft im Sinne einer NE-Effizienz schneller umdenken, Innovationen aufgreifen und entsprechende Märkte aufbauen.

Auf einige Beispiele zur Verwendung von Pflanzenkohle sei kurz verwiesen. Die *carbonauten GmbH* [12] oder *Made of Air GmbH* [18] bieten bereits Produkte aus Pflanzenkohle für unterschiedlichste Marktsegmente an, die erdöl- oder metallbasierte Produkte ersetzen. Darunter sind auch Materialien wie Folien, Autoteile oder Dämmmaterialien.

Eine Kooperation des Energie- und Pflanzenkohleproduzenten EnergieWerk Ilg, der Straßenbaufirma MIGU und dem Systemlieferanten Syncraft in Österreich hat erfolgreich erste Straßen mit einem Teer-Pflanzenkohle-Gemisch gebaut. Gemäß des Europäischen Pflanzenkohle-Verbandes ließen sich mit diesem Verfahren, übertragen auf den Europäischen Markt, jährlich über 9 Mio. t CO₂ binden.

Wird Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Böden eingearbeitet, trifft man auf andere Dimensionen in der Speicherdauer und Menge. Ein großer Anteil des Kohlenstoffs soll für mehrere Jahrhunderte im Boden verbleiben [22, 24, 35, 43]. Das Umweltprogramm der UN geht davon aus, dass in landwirtschaftlichen Flächen jährlich bis zu 4,8 Gt CO₂ gespeichert werden können. Andere Autoren [28] gehen von 0,5–2 Gt jährlich aus. Neben der Sequenzierung des CO₂ bietet diese humusmehrende Bewirtschaftungsmethode auch landwirtschaftliche Ertragssteigerung. Pflanzenkohleprodukte sind zudem Habitate für Mikroorganismen, haben u. a. eine hohe Wasserbindefähigkeit und adsorbieren toxische Bodenstoffe. Schadstoffe in den unterschiedlichen Ausgangsstoffen und sol-

che, die bei der Biokohleherstellung entstehen können, werden als potenzielle Risiken gesehen und sollen durch verfahrenstechnische Anpassungen minimiert werden.

Abkürzungen:

Mio:	Millionen
Mrd.:	Milliarden
NE:	Negativ Emission
Gt:	Gigatonnen (1000 Gt = 1000 Mrd Tonnen)

Moore als Kohlenstoffspeicher

Moore sind mit ihrer Torfbildung bedeutende Kohlenstoffspeicher, Schützer der Biodiversität [33], wirken als Hochwasser- und Dürre-Puffer und kühlen bei Hitzewellen über Verdunstung die Umgebung. Ihre Rolle im Kohlenstoffkreislauf ist ebenso komplex wie die anderer CO₂-Senken. Mooregebiete bedecken nur ca. 3% der Erdoberfläche, binden in ihren Torfschichten aber doppelt so viel CO₂ wie alle Wälder der Erde zusammen. Weltweit wird der Kohlenstoffgehalt in kohlenstoffreichen Böden (Moorböden) auf 550 Mrd. t C geschätzt [39].

Ein Hektar Moor speichert bis zu 6-mal so viel Kohlenstoff wie ein Hektar Wald. Jährlich entziehen sie der Atmosphäre weltweit 150–250 Mio. t CO₂ pro Jahr [21] und speichern es als Torf.

Die globale Kapazität der CO₂-Senke Moor könnte jedoch noch deutlich größer sein. Im Jahre 2017 wurde von britischen Forschern im Kongobecken/Cuvette Centrale das mit >145.000 km² möglicherweise größte tropische Moor weltweit entdeckt [3]. Die tatsächliche Größe muss noch verifiziert werden. Wissenschaftler errechneten, dass im Torf des Moores über 30 Mrd. Tonnen Kohlenstoff gespei-

chert sind. Altersuntersuchungen zeigten, dass sich unter dem überschwemmten Sumpfwald schon seit rund 10.600 Jahren Torf bis zu 6 m tief bildet.

Wachsende Moore binden je nach Standort und Typ unterschiedliche Mengen CO₂. Unter bestimmten Bedingungen emittieren sie aber auch klimawirksame Spurengase, z. B. entsteht in der Anfangsphase nach einer Vernässung durch den Menschen Methan. Allgemein wird die CO₂-Quellen- oder Senkenwirkung maßgeblich durch die hydrologischen Verhältnisse bestimmt. Im Verhältnis überwiegt aber die Senkenwirkung. Für entwässerte Moorböden kann die Senkenwirkung mittelfristig wieder aktiviert werden, wenn diese ganzjährig vernässt werden und sich dann eine torfbildende Vegetation eingestellt hat.

In vielen Ländern wurden und werden Moore trockengelegt und Torf abgebaut, auch um mehr landwirtschaftliche Fläche zu gewinnen. Damit werden sie zu beachtlichen CO₂-Quellen. Neben der Entwässerung bedrohen auch die durch die Erderwärmung verursachten Trockenperioden diese wichtigen Kohlenstoffspeicher. Moorbrände sind häufig die Folge. So haben beispielsweise Torfbrände in Südostasien den stärksten Anstieg der CO₂-Emission in der Atmosphäre in den letzten Jahren verursacht [32].

Inzwischen wurde in vielen Ländern der Wert dieser CO₂-Senke erkannt. Neben Schutzmaßnahmen gibt es zahlreiche Renaturierungsprojekte. Im Oktober 2021 hat die Bundesregierung bis 2025 rund 330 Millionen Euro für die Wiedervernässung von Moorböden bereitgestellt [15].

Das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt in Mecklenburg-Vorpommern bietet mit *Moor Futures*[®] [29] Zertifikate

für die freiwillige Kompensation an und finanziert damit Projekte zur Wiedervernässung. Brandenburg und Schleswig-Holstein haben sich dieser Idee angeschlossen. Das Institut für Botanik und Landschaftsökologie der Universität Greifswald mit der Stiftung Greifswald Moor Centrum [11, 17] bringt Transparenz in das Leben eines Moores und begleitet Wiedervernässungsprojekte wissenschaftlich.

Im Kohlenstoffkreislauf nehmen Moore eine Sonderstellung ein. Im Vergleich zu Wäldern bleibt biologisches Material konserviert und Kohlenstoff gelangt über einen längeren Zeitraum nicht wieder in die Atmosphäre. Der Schutz und die Wiedervernässung von Mooren im NE-Programm muss weltweit einen noch höheren Stellenwert einnehmen, denn mit relativ wenig Fläche kann CO₂ für lange Zeit gebunden und es können die Biodiversität gefördert und gravierende CO₂-Emissionen verhindert werden.

Seegras als Kohlenstoffspeicher

Seegraswiesen standen in den letzten Dekaden wenig im Fokus der NE-Maßnahmen – leider, denn Seegras ist ein **Allrounder**: Es verbessert die Wasserqualität, schützt Küsten, sichert die Biodiversität und ist ein Gigant unter den CO₂-Absorbern [7]. Geschätzt wird, dass ein Hektar Seegraswiesen 10- bis 30-mal mehr CO₂ absorbiert als ein Hektar Wald, sogar etwas mehr als alle Mangrovenwälder zusammen. Die Angaben dazu schwanken in der Literatur.

Die Wurzelmasse der Seegraswiesen schichten sich zu meterdicken Matten übereinander und nimmt CO₂ für Dekaden bis Jahrhunderte aus dem Kreislauf. Aber wie jede biologische Senke sind



auch die Seegraswiesen komplexe Systeme, über die wir noch zu wenig wissen. Seegrasart, Sedimenteigenschaften, Tiefe der Lebensräume und globaler Standort entscheiden über die Bilanz zwischen CO₂-Absorption und CO₂-Emission, denn die in den Seegraswiesen lebenden Tiere, Bakterien, Algen, etc. setzen beachtliche Mengen CO₂ frei.

Wissenschaftler der Florida International University identifizieren Seegrasstandorte, untersuchen diese konkurrierenden Prozesse, um Entscheidungen für ein Optimum zwischen Naturschutz und Speicherpotenzial zu unterstützen [10].

Die Seegraswiesen verschwinden weltweit in einem alarmierenden Tempo durch Überfischung, Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft oder die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Klimawandel bedingten Extremereignissen. So kam es z. B. 2010/2011 bei einer Hitzewelle an der Westküste Australiens zu Schäden an mehr als einem Drittel der dortigen Seegrasbestände, die zum UNESCO-Welterbe gehören [1].

Wie Fourqurean et al. im Fachjournal *Nature Geoscience* berichten, haben sich seit Beginn des 20. Jahrhunderts ca. 30% der bekannten Seegraswiesen in lebensarmen Meeresgrund verwandelt

und der Schrumpfpfprozess setzt sich mit etwa 1,5% jährlich fort [7].

Untersuchungen im Meeresboden der Ostsee zeigen, wie gravierend diese Verluste sind. Seegras bedeckter Meeresboden ist 2- bis 60-mal so reich an organischem Kohlenstoff wie Sediment ohne Seegras [38]. Weltweit laufen mehrere erfolgreiche Seegrasanpflanzungsprojekte, z. B. vor Wales, Virginia und in der Ostsee. Vor der Küste Wales wurden bereits 2 Hektar bepflanz. Bis 2030 wollen WWF, Sky Zero und die Swansea Universität/Wales in Kooperation insgesamt 30 km² Seegraswiesen wiederherstellen [14]. An der Ostküste der USA führt ein Forscherteam des Virginia Institute of Marine Science und The Nature Conservancy seit 1999 eine der größten Seegrasanpflanzungsprojekte durch [25]. Auf einer Fläche von 240 Hektar wurden 72 Millionen Seegrassamen verstreut, die jetzt 3800 Hektar mit Seegras bedecken. Überraschend in diesem Projekt: In den neuen Seegraswiesen wurden 2021 erstmals außergewöhnlich viele Aale (*Anguilla rostrata*) entdeckt.

Auch in der Ostsee wird versucht, die Anpflanzung zu optimieren, um herauszufinden, was die heimischen Seegräser zu leisten vermögen. Unter der Regie von Thorsten Reusch, Leiter der Forschungseinheit Marine Evolutionsökologie am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel [34], pflanzen Taucher Stecklinge in das Sediment. Erste Ergebnisse zeigen Sprosszahlen, die sich nach 4 Monaten verfünffacht bis verachtfacht haben. Damit könnte nach nur zwei Wachstumsperioden die Dichte einer natürlichen Wiese erreicht werden.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schätzen, dass Seegraswiesen entlang der deutschen Ostseeküste ca. 10 kg Kohlenstoff pro m² speichern und Seegraswiesen in der Ostsee ca. 13–28 Mio Tonnen CO₂-Emissionen kompensieren können.

Die Vorteile der Maßnahme Seegrasanpflanzungen sind beachtlich: Seegras brennt nicht, muss nicht gewässert werden, hat Multischutzfunktionen für das Leben in den Ozeanen, ist der fleißigste CO₂-Speicher, benötigt keinen Dünger, keine Herbizide, Insektizide oder Fungizide. Ein weiterer Eintrag von Schadstoffen inkl. CO₂ könnte diese erfolgsversprechende Maßnahme jedoch verhindern bzw. entscheidend beeinflussen.

Versteinerung als Kohlenstoffspeicher

Wird CO₂ in warmem Wasser gelöst und mit Vulkangestein, z. B. *Basalt* (Silikat-Gemisch), zusammengebracht, entstehen daraus nach ca. 2 Jahren neue Gesteinsarten. Aus Gas wird Stein! Es sind Mineralien, wie Kalzium-, Magnesium-, oder Eisenkarbonat, die überall in der Erdkruste in großen Mengen vorkommen. Kalziumkarbonat kommt u. a. als Marmor oder Kalkstein vor. Basalt reagiert deshalb relativ leicht mit CO₂, weil es ursprünglich im Schmelzprozess (Magma) tief in der Erdkruste seinen Kohlenstoff verloren hat. Die Hitze des Magmas hat es zu CO₂ verwandelt. Deshalb spucken Vulkane u. a. Gase aus, wenn sie explodieren.

Mit der CO₂-Versteinerung wird partiell der natürliche Steinzyklus nachgeahmt

bzw. beschleunigt. Mineralien verwittern an der Erdoberfläche, nehmen CO₂ auf und sinken über lange Zeiträume in die Tiefe, wo sie zu Magma geschmolzen werden und CO₂ wieder freigeben.² Dann gelangen sie als Lava an die Erdoberfläche und erstarren zu Vulkangestein, u. a. zu Basalt. Die weltweiten Vorkommen von Basalt und ähnlicher Gesteinsarten würden ausreichen, um weit mehr als 1000 Gt CO₂ zu binden. Wie die Carbfix Mitarbeiter Aradóttir und Helgason erläutern, ließe sich allein im Boden Islands 80- bis 200-mal so viel CO₂ lagern, wie die Weltgemeinschaft jährlich ausstößt [42], d. h. 3000–7000 Gt. Geschätzt wird, dass 5% der Kontinente basalthaltige Gesteinsformationen haben und die geologischen Formationen der Ozeane ein noch viel höheres Potenzial bieten [4].

Die Unternehmen Carbfix, Orca und Climeworks isolieren auf Island CO₂ aus der Luft, lösen es in warmem Wasser, das in Island reichhaltig zur Verfügung steht und pressen es in die basaltreiche Tiefe. Nach 2 Jahren haben sich 95% des im Wasser gelösten CO₂ in stabile Karbonate verwandelt [26, 36]. 100.000 t CO₂ wurden auf Island bereits in Stein verwandelt. Bis 2030 sollen es mehrere Millionen Tonnen werden.

Der Preis pro Tonne CO₂-Versteinerung könnte schon bald unter 20,00 € liegen (weitere Informationen s. Carbfix Datenbank [16]). Auch in anderen Ländern werden CO₂-Versteinerungsprojekte betrieben, z. B. im Südosten des Bundesstaats Washington [27].

Die CO₂-Versteinerung ist möglicherweise das bedeutendste unter den bekannten NE-Maßnahmen. Es greift in keine komplexen, sensiblen CO₂-Kreisläufe ein und speichert CO₂ für viele Millionen Jahre. Prozessoptimierungen stehen

2 Die CO₂-Emissionen der Vulkane betragen nur einen Bruchteil von dem, was wir Menschen jährlich emittieren. Geschätzte Jahreswerte liegen zwischen 260–360 Mio t CO₂. Deutschland hat 2020 ca. 600 Mio t CO₂ emittiert. ↗ <https://weather.com/de-DE/wissen/klima/news/2022-01-19-co2-ausstoss-welchen-einfluss-die-aktuellen-vulkanausbruche-auf-den> (aufgerufen am 7.2.2022)

noch aus. Hürden sind die Wasser- und Energiemengen, die für das Verfahren gebraucht werden. Es ist deshalb wichtig, ausreichend regenerative Energie zur Verfügung zu haben und salzhaltiges Meerwasser verwenden zu können [41]. Auch nach einem Druck-Temperatur-Optimum wird noch gesucht.

Die CO₂-Versteinerung ist bereits heute für jeden möglich: Die Climeworks AG bietet für jedermann an, 15 kg CO₂ für 15,00 € pro Monat in Island zu versteinern [13] (Preis Dez. 2021).

Fazit

Die Folgen der atmosphärischen Überlastung mit >1000 Gt CO₂ (280 ppm vor der Industrialisierung und 420 ppm 2021), während eines im erdgeschichtlichen Maßstab sehr kurzen Zeitraums, sind nicht vollends prognostizierbar. Um diese Gasmenge während der nächsten 80 Jahre oder schneller dauerhaft zu lagern oder zu binden, ohne dass weitere ökologische oder erdsystemische Risiken oder Schäden entstehen, gibt es noch keine ausgereiften Technologien, aber relevante Ansätze und Erkenntnisse, wie CO₂ vorübergehend und dauerhaft „entsorgt“ werden könnte.

Wieder-/Aufforstung hat für eine langfristige Speicherung begrenzten Nutzen, da der biologische Mechanismus der CO₂-Speicherung reversibel ist und sie in Konkurrenz zu anderen notwendigen Bodennutzungen steht. Sie hat dennoch Priorität, weil sie je nach Nutzungsdauer der Holzprodukte CO₂ für längere Zeit speichern kann.

Die Masse der **Pflanzkohle** ist begrenzt, speichert CO₂ je nach Anwendung für kurze (Beton, Dämmstoffe, Teer) aber auch für längere Zeiträume (Humusaufbau).

Moore sind bedeutsame Kohlenstoffsenken, solange sie wachsen und Torfbilden. Sie können dann CO₂ für lange Zeiträume speichern. Für entwässerte Moorböden kann die Senkenwirkung wieder aktiviert werden, wenn diese vernässt werden und sich eine torfbildende Vegetation einstellt hat.

Das **Seegrass** hat möglicherweise die größte Speicherkapazität unter den biologischen CO₂-Senken. Gemeinsam mit den Wäldern und Mooren hat es multifunktionalen ökologischen Nutzen. Zum Verbleib des Kohlenstoffs über 1000 Jahre hinaus liegen noch keine ausreichenden Befunde vor. Bisherige Wiederbelebungsprojekte von Seegrasswiesen sind erfolgreich und sollten mehr in den Fokus der NE-Strategien gerückt werden.

Die **CO₂-Versteinerung** stellt eine Option dafür dar, CO₂ für Millionen Jahre im Gt-Maßstab zu binden. Sie beschleunigt natürliche geologische Prozesse, bedarf weiterer Entwicklung in der großtechnischen Anwendung. CO₂-Versteinerung entspricht dabei einer Methode, die die Natur seit Milliarden bzw. Millionen Jahren praktiziert.

Wieder-/Aufforstung und Pflanzkohle können zur Emissionsreduktion beitragen, wenn durch ihre Verwendung erdöl-, beton- und metallbasierte Produkte ersetzt werden, und sie sind, wie **Seegrass**, wichtige Träger für den Erhalt der Biodiversität.

NE-Maßnahmen sollten sich auf Schutz, Wiederbelebung, Expansion und Nachahmung natürlicher Systeme beschränken. Andere zurzeit diskutierte NE-Maßnahmen mit vielen Unbekannten (z. B. Ozean-Alkalisierung oder Bioenergie-Plantagen) sollten dagegen kritisch geprüft werden. Die Selektion der optimalen NE-Maßnahmen nach Speicher-

kapazität, Sicherheit, Speicherdauer, Verfügbarkeit, „ökologischem Nutzungsgrad“ und Kosten muss schnell erfolgen. Wir benötigen eine NE-Entwicklungsbeschleunigung. Die Kosten für mögliche Schäden durch die immer teurer werdenden Klimawandelfolgen sollten den Kosten der künftigen NE-Maßnahmen gegenübergestellt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass ohne NE in naher Zukunft ein oder mehrere Kippunkte erreicht werden.

Solomon et al. errechneten, dass aufgrund der Wärmekapazität und Trägheit der Ozeane die mittlere Oberflächentemperatur für 1000 Jahre nicht signifikant sinken würde, selbst wenn die THG-Konzentration kurzfristig vorindustrielles Niveau erreichen würde [37]. Wenn diese Berechnungen zutreffen und die 1,5°C- bzw. 2°C-Grenze nicht mehr einzuhalten ist, wird das Entfernen von CO₂ aus der Atmosphäre zur Überlebensfrage unserer Kinder. Denn der Planet wird mit einer über mehrere hundert Jahre anhaltenden Epoche der Überhitzung nach einem neuen Gleichgewicht suchen – und wenn wir nicht rechtzeitig reagieren, wird er es ohne uns tun.

Dr. Ing. Michael Trapp

Carbonroundtable e. V.
klimaerben@t-online.de

Mit freundlicher Unterstützung von carbonauten GmbH, Giengen, Prof. Dr. Torssten Sachs, Deutsches Geoforschungszentrum Potsdam, Dr. Michael Trepel, Christian Albrechts Universität Kiel, Dr. Manfred Treber, Germanwatch, Dr. Peter Weiss, Umweltbundesamt Wien und Dr. Thomas Ledermann, Bundesforschungszentrum für Wald, Wien.

Literatur

- 1 Arias-Ortiz A, Serrano O, Masqué P et al. A marine heatwave drives massive losses from the world's largest seagrass carbon stocks. *Nature Climate Change* 2018; 8: 338–344
- 2 Churkina G, Organschi A, Reyer CPO et al. Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 2020; 3: 269–276
- 3 Dargie Greta C, Lewis Simon L, Lawson, Ian T. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature* volume 2017; 542: 86–90
- 4 Dessert C, Dupré B, Gaillardet J et al. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology* 2003; 202(3–4): 257–273
- 5 **Deutschland Forstet Auf** gUG, Berlin; verfügbar unter: [↗ https://deutschland-forstet-auf.de/](https://deutschland-forstet-auf.de/), aufgerufen am 24.1.2022
- 6 Fischlin A. et al. CO₂-Senken und -Quellen in der Waldwirtschaft, *Umwelt-Wissen* 2006; Nr. 0602. Bundesamt für Umwelt, Bern: 25
- 7 Fourqurean JW, Duarte CM, Kennedy H, Marba N, Holmer M. Seagrass Ecosystems as a Globally Significant Carbon Stock. *Nature Geoscience* 2012; 5: 505–509
- 8 Fuss S, Lamb WF, Callaghan MW et al. Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Lett.* 2018; 13 063002
- 9 Gatti LV, Basso LS, Miller JB et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 2021; 595: 388–393
- 10 Howard JL, Creed JC, Aguiar MVP, Fourqurean JW. CO₂ released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass "Blue Carbon" storage. *Limnology and Oceanography* 2018; 63(1): 160–172
- 11 [↗ https://botanik.uni-greifswald.de/](https://botanik.uni-greifswald.de/)
- 12 [↗ https://carbonauten.com/](https://carbonauten.com/); aufgerufen am 24.1.2022
- 13 [↗ https://climeworks.com/subscriptions](https://climeworks.com/subscriptions)
- 14 [↗ https://seagrass.org.uk/](https://seagrass.org.uk/) und [↗ https://marineindustrynews.co.uk/de/seagrass-restoration-project-for-the-uk/](https://marineindustrynews.co.uk/de/seagrass-restoration-project-for-the-uk/)
- 15 [↗ https://www.agrarheute.com/politik/ueber-300-mio-euro-fuer-moorschutz-bund-laender-einigen-586529](https://www.agrarheute.com/politik/ueber-300-mio-euro-fuer-moorschutz-bund-laender-einigen-586529)
- 16 [↗ https://www.carbfix.com/scientific-papers](https://www.carbfix.com/scientific-papers)
- 17 [↗ https://www.greifswaldmoor.de/start.html](https://www.greifswaldmoor.de/start.html)
- 18 [↗ https://www.madeofair.com/](https://www.madeofair.com/), aufgerufen am 24.1.2022
- 19 [↗ https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/04/from-the-well-to-the-wheel.html](https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/04/from-the-well-to-the-wheel.html); aufgerufen am 24.1.2022
- 20 Hubau W, Lewis SL, Phillips OL et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 2020; 579(7797): 80–87
- 21 Joosten H. Moorschutz in Europa. Restauration und Klimarelevanz. In: BUND Landesverband Niedersachsen (Hrsg.): *Moore in der Regionalentwicklung*. BUND, Wagenfeld/Ströhen, 2006: 35–43
- 22 Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling *Soil Biology & Biochemistry* 2009; 41: 210–219
- 23 Ledermann T, Weiss P. [↗ https://uma.or.at/wp-content/uploads/ThomasLedermann24092020.pdf](https://uma.or.at/wp-content/uploads/ThomasLedermann24092020.pdf); (aufgerufen am 14.1.2022) und [↗ https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/B670274-ACRP9-CareforParis-KR16AC0K13154-EB.pdf](https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/B670274-ACRP9-CareforParis-KR16AC0K13154-EB.pdf)
- 24 Lehmann J. Bio-energy in the black. *Ecology and the Environment* 2007; 5(7): 381–387
- 25 Marine Habitat Restoration. The Volgenau Virginia Coast Reserve is putting science to work in Virginia's coastal bays. 2018; verfügbar unter: [↗ https://www.nature.org/en-us/about-us/where-we-work/united-states/virginia/stories-in-virginia/vcr-marine-restoration/](https://www.nature.org/en-us/about-us/where-we-work/united-states/virginia/stories-in-virginia/vcr-marine-restoration/)
- 26 Matter JM, Stute M, Snaebjörnsdóttir SO. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 2016; 352(6291): 1312–1314
- 27 McGrail BP, Schaef HT, Spane FA et al. Wallula Basalt Pilot Demonstration Project: Post-injection Results and Conclusions. *Energy Procedia* 2017; 114: 5783–5790
- 28 Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change gGmbH; verfügbar unter [↗ https://www.mcc-berlin.net/forschung/kurzdoersiers/co2-entnahme.html](https://www.mcc-berlin.net/forschung/kurzdoersiers/co2-entnahme.html); aufgerufen am 14.1.2022
- 29 Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern [↗ https://www.moorfutures.de/](https://www.moorfutures.de/)
- 30 Mix JC, Lamb WF, Callaghan MW et al. Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis *Environ. Res. Lett.* 2018; 13 063001
- 31 Nemet GF, Callaghan MW, Vreutzig F et al. Negative emissions – Part 3: Innovation and upscaling. *Environ. Res. Lett.* 2018; 13 063003
- 32 Page SE, Siegert F, Rieley JO et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 2002; 420: 61–65
- 33 Parish et al. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre and Wetlands International, 2008
- 34 Reusch T. The evolving clone. GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel; verfügbar unter [↗ https://ecoevocommunity.nature.com/posts/the-evolving-clone](https://ecoevocommunity.nature.com/posts/the-evolving-clone)
- 35 Schmidt MWI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Glob. Biogeochem. Cycles* 2000; 14: 777–794
- 36 Snaebjörnsdóttir SO, Wiese F, Fridriksson T et al. CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia* 2014; 63:4585–4600
- 37 Solomon S, Plattner G-K, Knutti R, Friedlingstein P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS* 2008; 106(6): 1704–1709
- 38 Stevenson A. DEOMAR Kiel: [↗ https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/20210414_PM03_Kohlenstoff-Hotspots%20in%20der%20Ostsee.pdf](https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/20210414_PM03_Kohlenstoff-Hotspots%20in%20der%20Ostsee.pdf)
- 39 Trepel M. Zur Bedeutung von Mooren in der Klimadebatte. Jahresbericht des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 2007/08. Verfügbar unter: [↗ https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/jahrbe07/Zur%20Bedeutung%20von%20Mooren.pdf](https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/jahrbe07/Zur%20Bedeutung%20von%20Mooren.pdf)
- 40 Tripati AK, Roberts CD, Eagle RA. Coupling of CO₂ and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years, *Science* 2009; 326 (5958): 1394–1397
- 41 Voigt M, Marieni C, Baldermann A et al. An experimental study of basalt–seawater–CO₂ interaction at 130 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 2021; 308: 21–41
- 42 Von Brackel B. CCS-Technologie gegen den Klimawandel: Begraben in der Tiefe des Gesteins. *taz* 2021; verfügbar unter: [↗ https://taz.de/CCS-Technologie-gegen-den-Klimawandel/!5807254/](https://taz.de/CCS-Technologie-gegen-den-Klimawandel/!5807254/) (aufgerufen am 2.2.2022)
- 43 Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y et al. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy* 2016; 8 N3: 512–523