



Mögliche Beiträge geologischer und mariner Kohlenstoffspeicher zur Dekarbonisierung

*Andreas Oschlies, Nadine Mengis, Gregor Rehder, Eva Schill,
Helmuth Thomas, Klaus Wallmann und Martin Zimmer*

Inhaltsverzeichnis

- 35.1 Terrestrische Kohlenstoffspeicherung im tiefen
Untergrund – 450**
 - 35.1.1 Einlagerung von CO₂ – 450
 - 35.1.2 In-situ-Karbonisierung – 451
- 35.2 Marine Kohlenstoffspeicherung – 452**
 - 35.2.1 Physikalisch – 452
 - 35.2.2 Chemisch: Alkalinisierung – 453
 - 35.2.3 Biologische Eisendüngung – 454
- 35.3 Fazit – 456**
- 35.4 Kurz gesagt – 456**
 - Literatur – 456

Es klappt weiterhin eine große Lücke zwischen den im Pariser Übereinkommen vereinbarten Klimazielen und den bisher umgesetzten Klimaschutzmaßnahmen. Mittlerweile gehen alle im 1,5-Grad-Sonderbericht des Weltklimarats betrachteten Szenarien davon aus, dass selbst bei drastischen Emissionsminderungen bis zur Mitte des Jahrhunderts global jährlich einige Milliarden Tonnen Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entnommen und sicher und dauerhaft gespeichert werden müssen, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen (IPCC 2018). Im Übereinkommen von Paris haben sich die Unterzeichner explizit dazu verpflichtet, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine vollständige Balance zwischen Quellen und Senken von Treibhausgasen, insbesondere CO₂, herzustellen. Es gibt verschiedene Ideen, wie die Last der globalen CO₂-Entnahme fair auf Länder und Regionen verteilt werden könnte (Fyson et al. 2020; Pozo et al. 2020). Dabei wird auch Deutschland einen signifikanten Teil zur globalen CO₂-Entnahme beitragen müssen, nämlich bis Ende des Jahrhunderts entsprechend verschiedener Fairnessprinzipien 5 bis 18 Mrd. t CO₂ (Pozo et al. 2020). Dies entspricht Entnahmemengen von 60 bis 225 Mio. t CO₂ pro Jahr, d. h. 10 bis 30 % der heutigen deutschen Emissionen von rund 700 Mio. t pro Jahr. Diese Mengen sind mehr als nach heutigem Verständnis mit naturnahen Lösungen wie Wiederaufforstung und Moorvernässung (► Kap. 34) in Deutschland machbar erscheint.

Im Folgenden werden daher die Potenziale geologischer und mariner Speicherverfahren im Hinblick auf ihre möglichen Beiträge zur Dekarbonisierung betrachtet. Unsere Zusammenstellung hat einen starken Fokus auf Deutschland, beinhaltet aber vor allem im marinen Bereich auch Speicher, die über die deutschen Hoheitsgebiete hinausgehen und deren Anrechnung auf das deutsche Kohlenstoffbudget internationale Regelwerke erfordern würde. Eine Betrachtung geologischer Verfahren erscheint naheliegend, da der im Vergleich zum vorindustriellen Zeitraum überschüssige Kohlenstoff in der Atmosphäre im Wesentlichen der Geosphäre entstammt (z. B. Boden et al. 2009). Diese bietet sowohl eine hohe Volumenkapazität für die Entsorgung als auch die Möglichkeit der dauerhaften Speicherung in tiefliegenden Reservoirs unter dem Land oder dem Meeresboden. Weltweit wurden im Jahr 2019 etwa 25 Mio. t CO₂ permanent in Anlagen zur Kohlenstoffentnahme und -speicherung (*carbon capture and storage*, CCS) in geologischen Speicherstätten in Australien, Brasilien und den USA gelagert (Global CCS Institute 2019). Dieses CO₂ stammt bisher im Wesentlichen aus mit fossilen Energieträgern betriebenen industriellen Anlagen und Kraftwerken. Mit derart „herkömmlichem“ CCS werden somit Emissionen in die Atmosphäre reduziert. Falls das CO₂ jedoch aus Bioenergie- oder *Direct-air-capture*-Anlagen (direkte

Kohlenstoffentnahme aus der Luft) stammt, könnte eine netto CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre erreicht werden. In Deutschland wurde bis 2017 die technische Machbarkeit des gesamten Lebenszyklus der geologischen CO₂-Speicherung in einer Pilotanlage in industriellem Maßstab erfolgreich aufgezeigt (Lüth et al. 2020). Aufgrund von mangelnder Akzeptanz wurde CCS in Deutschland jedoch nicht weiter umgesetzt. Falls CCS eine signifikante Rolle für das Erreichen der Ziele des Pariser Übereinkommens spielen sollte, wäre ein beträchtlicher Ausbau dieser Technologie erforderlich.

Eine Betrachtung mariner Speicherverfahren begründet sich auf der Beobachtung, dass die Ozeane klimahistorisch eine wesentliche Bedeutung für die Stabilisierung atmosphärischer CO₂-Konzentrationen hatten. Schon jetzt hat der Ozean mehr als ein Viertel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen (Gruber et al. 2019) und damit wesentlich zur Minderung anthropogen verursachter Treibhausgaswirkungen beitragen. Über die nächsten tausend bis hunderttausend Jahre wird der Ozean über natürliche Prozesse etwa 90 % des anthropogenen CO₂ aufnehmen und permanent speichern (Archer und Brovkin 2008). Methoden zur marinen CO₂-Aufnahme haben zum Ziel, diese langsame Aufnahmerate deutlich zu erhöhen.

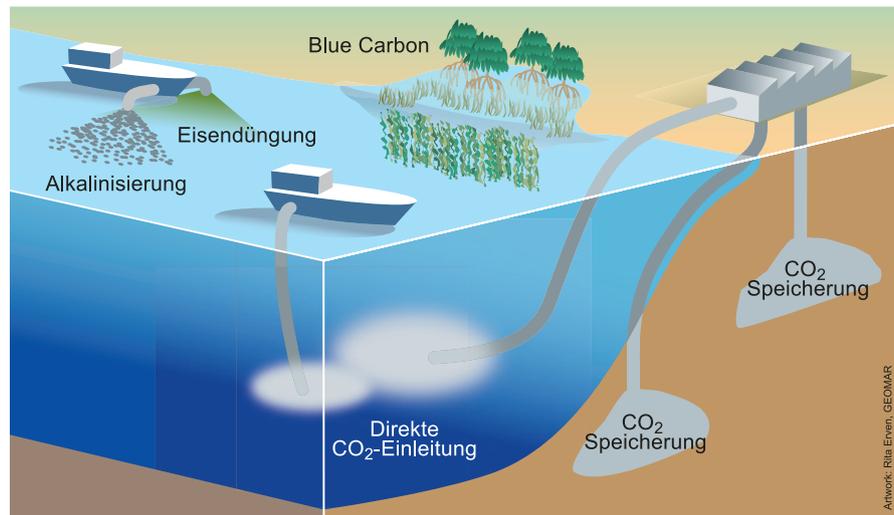
Zunächst werden in ► Abschn. 35.1 technologische Speicherverfahren vorgestellt, bei denen komprimiertes CO₂ in Speicherreservoirs im Erdboden eingeleitet wird. Bei diesen Verfahren ist eine gut vernetzte Logistik zwischen CO₂-Entnahme und CO₂-Speicherung erforderlich. Ähnliche Anforderungen ergeben sich für die Einlagerung von CO₂ in geologische Speicher unter dem Meeresboden, die als erstes marines Verfahren in ► Abschn. 35.2 vorgestellt wird, bevor chemische und biologische Methoden betrachtet werden, die im Wesentlichen natürliche Prozesse beschleunigen, um CO₂ direkt aus der Atmosphäre zu entnehmen. Die in diesem Kapitel behandelten Methoden sind schematisch in ■ Abb. 35.1 dargestellt.

35.1 Terrestrische Kohlenstoffspeicherung im tiefen Untergrund

35.1.1 Einlagerung von CO₂

Die CO₂-Injektion in geologische Formationen mit Reservoirseigenschaften, die durch ein übergelagertes Barrieregestein zur Erdoberfläche hin abgedichtet sind, ist eines der vielversprechendsten Verfahren, die in den letzten ein bis zwei Jahrzehnten entwickelt wurden (Raza et al. 2019). Bislang wurde die untertägige Technologieentwicklung für CCS im Wesentlichen in der direkten Speicherung in porösen Gesteinsschichten

■ **Abb. 35.1** Schematische Darstellung der in diesem Kapitel diskutierten CO₂-Entnahmemethoden.



(wie z. B. Sandsteinformationen) vorangetrieben. Dies beinhaltet sowohl die Nutzung von ausgeförderten Kohlenwasserstoffreservoirien – weltweit dienen heute 14 der 18 CCS-Großprojekte (mit einer mittleren jährlichen Kohlenstoffentnahme von jeweils über 400 Tausend t CO₂) dazu, durch die CO₂-Injektion das Öl an die Oberfläche zu drücken und damit die Ölförderung zu erhöhen – als auch von sogenannten salinaren Aquiferen (salzwasserführende Grundwasserleiter), deren Salzgehalt über der Trinkwasserqualität liegt. Beide Typen weisen über geologische Zeiträume bereits eine natürliche Dichtigkeit auf. Optimale CO₂-Speicherbedingungen stellen sich hier aufgrund der Umgebungsdrücke und -temperaturen in Tiefen von über 800 m unter der Erdoberfläche ein. Unter diesen Bedingungen geht CO₂ in den überkritischen Zustand über und erreicht ein Volumenminimum bzw. ein Dichtemaximum.

Knopf und May (2017) berechnen für Deutschland potenzielle Speicherkapazitäten von mehr als 16,2 Mrd. t CO₂ (mit einer 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit), davon können über 2,75 Mrd. t auf ausgeförderte Erdgasfelder und über 12,8 Mrd. t auf salinare Aquifere verteilt werden (Knopf et al. 2010). Die Anwendung salinärer Aquifere für eine dauerhafte CO₂-Speicherung wurde am Standort Ketzin (Brandenburg) im Zeitraum zwischen Juni 2008 und August 2013 erfolgreich demonstriert. Hier wurden 67 Tausend t CO₂ in einen salinaren Aquifer, der von einer 165 m mächtigen Tonstein- und Anhydritschicht nach oben hin abgedichtet ist, eingebracht (Martens et al. 2014). Nach Beendigung der Forschungsarbeiten wurde der Speicher stillgelegt und die Bohrungen sachgerecht verschlossen (Schmidt-Hattenberger et al. 2019). Die begleitende Überwachung hat gezeigt, dass am Pilotstandort Ketzin die CO₂-Speicherung seit Beginn der Speicherung im Jahr 2008 sicher und für Mensch und Umwelt ungefährlich verläuft. Die recht-

lichen Rahmenbedingungen zur sicheren CO₂-Speicherung im tiefen Untergrund sind durch die Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. April 2009 zur geologischen Speicherung von Kohlendioxid¹ gegeben. In Deutschland sind CO₂-Transport und -Speicherung zum Einsatz von CCS durch das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid vom 24. August 2012 (KSpG)² gesetzlich geregelt. Dieses Gesetz lässt die Erforschung, Erprobung und Demonstration der CO₂-Speicherung in begrenztem Ausmaß zu, mit einer Höchstspeichermenge für Deutschland von 4 Mio. t CO₂ pro Jahr insgesamt bzw. 1,3 Mio. t CO₂ pro Jahr und Speicher. Eine Speichereerkundung findet aktuell nicht statt, nachdem die Frist dafür Ende 2016 abgelaufen ist. Zusätzlich regelt eine Länderklausel die Option zum generellen Verbot der CO₂-Speicherung durch einzelne Länder. Aufgrund der geringen öffentlichen Akzeptanz von Kohlenstoffspeicherung in geologischen Speicherstätten an Land (Deutscher Bundestag 2018) konzentriert sich die Industrie derzeit auf ähnliche Bedingungen im marinen Bereich (► Abschn. 35.2).

35.1.2 In-situ-Karbonisierung

Abhängig von der Verteilung und der Temperatur stellt sich ein natürliches Karbonatmineral-Kohlensäure-Gleichgewicht bei der CO₂-Speicherung im Untergrund ein. Die damit verbundene natürliche Karbonisierung von CO₂ im tiefen Untergrund läuft in vielen Gesteinen auf einer geologischen Zeitskala (also über Millionen von Jahren) ab. Gesteine, die Silikat-Mineralen mit einem hohen molaren Anteil an zweiwertigem Magnesium,

1 ► <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/31/oj>

2 ► <https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/BJNR172610012.html>

Kalzium oder Eisen enthalten, weisen das größte mineralische Karbonisierungspotenzial auf (Matter et al. 2011). Diese Minerale kommen hauptsächlich in Gesteinen wie Basalt und Mantelperidotit vor. Großflächige natürliche CO₂-Mineralisierung erfolgt in der ozeanischen Kruste in submarinen, vulkanisch-geothermischen Systemen. In den obersten Kilometern der Mittelozeanischen Rücken werden durch CO₂-Wasser-Basalt-Wechselwirkung in der hydrothermal aktiven Kruste jährlich ca. 40 Mio. t CO₂ mineralisiert (Alt und Teagle 1999).

Das CarbFix-Pilotprojekt in Island demonstriert schrittweise die technische Machbarkeit der In-situ-Karbonisierung von Mineralen in Basaltgestein als eine Möglichkeit der dauerhaften und sicheren CO₂-Speicherung (Matter et al. 2011). Nach der erfolgreichen Mineralisierung von 95 % des gelösten CO₂ bzw. CO₂-H₂S-Gemisches von insgesamt 230 t in 500 m Tiefe bei 20 bis 50 °C innerhalb von zwei Jahren wurde in CarbFix in einem zweiten Schritt gasbeladenes Wasser bei Temperaturen von circa 250 °C bis in eine Tiefe von ca. 800 m in das basaltische Reservoir injiziert (Snæbjörnsdóttir et al. 2020). Aufgrund des Säuregrades bewirkt dieses Fluid eine Mineralauflösung im bohrlochnahen Bereich. Infolgedessen erhöht sich der pH-Wert der Flüssigkeit, der für die Kohlenstoffkarbonisierung geeignet ist, mit zunehmendem Abstand zur Bohrung. Diese räumliche Verteilung von Lösung und Karbonisierung hat zur Folge, dass die Bohrung über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann. Derzeit werden im CarbFix-Projekt 12.000 t CO₂ jährlich gespeichert. Ähnliche Gesteinsarten sind weit verbreitet in Teilen des Oberrheingrabens und im Nordosten Deutschlands (Snæbjörnsdóttir et al. 2020). Banks et al. (2021) zeigen weiteres Potenzial für In-situ-Karbonisierung in hochsalinaren Aquiferen.

35.2 Marine Kohlenstoffspeicherung

Wir betrachten in diesem Abschnitt sowohl marine Kohlenstoffspeicher, die im deutschen Hoheitsgebiet liegen, als auch Speicherung, die in einem Transfer von Kohlenstoff in das Meerwasser besteht und damit geografisch weniger klar definierbar ist oder deren Anwendung in internationalen Gewässern angesiedelt wäre. Für Letztere wäre eine Anrechnung auf das nationale Kohlenstoffbudget über internationale Vereinbarungen vorstellbar.

35.2.1 Physikalisch

Einlagerung von CO₂ in geologischen Formationen unter dem Meeresboden

Der überwiegende Teil der europäischen Speicherkapazität befindet sich in Sandsteinformationen im tie-

feren Untergrund der Nordsee. Die bisherigen Schätzungen lassen vermuten, dass dort bis zu 150 Mrd. t CO₂ gespeichert werden können (Vangkilde-Pedersen 2009). Bisher wird in Europa nur in *Offshore*-Formationen im industriellen Maßstab CO₂ gespeichert. Im norwegischen Sektor der Nordsee (Sleipner Projekt, ca. 0.9 Mio. t CO₂ pro Jahr seit 1996) und der Barentssee (Snohvit Projekt, ca. 0.7 Mio. t CO₂ pro Jahr seit 2009) wird CO₂ injiziert, das aus dem dort geförderten Erdgas abgetrennt wird. Darüber hinaus befinden sich einige Projekte in Planung, die darauf abzielen, CO₂ aus industriellen Quellen in ausgeförderten Erdgaslagerstätten (z. B. PORTHOS Projekt, Niederländische Nordsee) und in Sandsteinformationen (Norwegische Nordsee) *offshore* zu speichern.

Obwohl die potenziellen Speicherformationen in der Deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone bisher nur zum Teil erkundet wurden, zeigen die verfügbaren Daten, dass im tiefen Untergrund der Deutschen Nordsee ca. 3,6 bis 10,4 Mrd. t CO₂ gespeichert werden könnten (Willscher 2007). Im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung ist vorgesehen, CO₂ im geologischen Untergrund zu speichern, das aus industriellen Emissionen stammt, die durch Produktionsumstellungen nicht vermieden werden können (Bundesregierung 2020). Zurzeit werden von der Industrie in Deutschland pro Jahr ca. 0,18 Mrd. t CO₂ emittiert (UBA 2020). Die Sandsteinformationen in der Deutschen Nordsee sind also von ihrem Potenzial her ausreichend groß, um diese industriellen Emissionen für einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten aufzunehmen. Darüber hinaus könnte dort CO₂ aus anderen Quellen gespeichert werden (z. B. Biogasnutzung, Müllverbrennung), um Emissionen zu vermeiden bzw. negative Emissionen zu erzielen. Der überwiegende Teil der Speicherformationen liegt im Hoheitsgebiet des Bundes, d. h. außerhalb des von den Bundesländern regulierten küstennahen Bereichs, sodass eine Speicherung möglicherweise auch dann umgesetzt werden könnte, wenn die norddeutschen Küstenländer weiterhin das generelle Verbot der CO₂-Speicherung in ihren Hoheitsgebieten aufrechterhalten würden. Allerdings ist der rechtliche Rahmen für diesen Fall bisher nicht abschließend geklärt. Aufgrund der Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung gehen viele Akteure in der Politik und Wirtschaft davon aus, dass die *Offshore*-CO₂-Speicherung in Deutschland größere Umsetzungschancen hat als die Speicherung an Land.

Die deutsche Nordsee wird intensiv genutzt. Neben der Fischerei, der Schifffahrt und der Extraktion geologischer Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Sandabbau) haben besonders die bestehenden und geplanten Windkraftanlagen einen erheblichen Platzbedarf. Darüber hinaus sind große Bereiche der Nordsee als Naturschutzgebiete ausgewiesen. Es ist daher damit zu rechnen, dass es bei der Umsetzung von *Off-*

shore-Speicherprojekten im industriellen Maßstab zu Nutzungskonflikten kommt. Es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf, um zu klären, ob im tiefen geologischen Untergrund CO_2 gespeichert werden kann, während die Oberfläche anderweitig genutzt wird. Es muss z. B. erforscht werden, ob die Mikroseismizität, die bei der Speicherung auftreten kann, die Stabilität von Windkraftanlagen gefährdet. Auch der seismische Lärm, der bei der Exploration und Überwachung der Speicher entstehen kann, stellt ein Risiko dar, z. B. für die lärmempfindlichen Schweinswale, die in der Nordsee weit verbreitet sind. Schließlich muss sichergestellt werden, dass es bei der CO_2 -Speicherung zu keinen nennenswerten Leckagen von CO_2 und teilweise toxischem, in den Gesteinsporen enthaltenem Wasser kommt. Besonders die alten Bohrlöcher, die in der Nordsee in großer Zahl zu finden sind, stellen ein Risiko dar, da es entlang dieser Bohrung zu Lecks kommen kann (Bottner et al. 2020). Bei den schon im Betrieb befindlichen *Offshore*-Speichern sind bisher keine Lecks aufgetreten (ECO₂-consortium 2015). Dennoch besteht weiterer Forschungsbedarf, um abschließend zu klären, ob und in welchem Maßstab die großen Speicherpotenziale der Nordsee für die Verminderung von CO_2 -Emissionen und den Klimaschutz genutzt werden können.

Injektion von CO_2 ins Tiefenwasser

Der Ozean nimmt derzeit per Gasaustausch über die Meeresoberfläche pro Jahr 7 bis 11 Mrd. t CO_2 aus der Atmosphäre auf (Le Quéré et al. 2018). Diese Rate ist im Wesentlichen durch die langsame Umläufbewegung des Ozeans bestimmt, die für den tiefen Ozean auf Zeitskalen von Jahrtausenden abläuft. Der Großteil des Meerwassers hatte daher seit Beginn der Industrialisierung noch keinen Kontakt mit der Atmosphäre. Eine frühe Idee zur künstlichen Beschleunigung der marinen CO_2 -Aufnahme besteht darin, den CO_2 -Transport durch die langsame Ozeanzirkulation abzukürzen und komprimiertes und verflüssigtes CO_2 oder verfestigtes CO_2 direkt per Pipeline oder von Schiffen aus in den tiefen Ozean zu injizieren (Marchetti 1977). Dabei würden tiefe Ökosysteme direkt an den Einleitstellen beeinträchtigt werden (Tamburri et al. 2000; Israelsson et al. 2009). Da sich durch die Einleitung von CO_2 direkt in den tiefen Ozean die Menge des in die Atmosphäre emittierten CO_2 verringert, werden gleichzeitig auch die CO_2 -Aufnahme in das Oberflächenwasser aus der Atmosphäre und die daraus resultierende Versauerung an der Meeresoberfläche reduziert (Reith et al. 2019), die derzeit als ein großes Problem für marine Ökosysteme angesehen wird, insbesondere in Bezug auf Kalkschalen-bildende Organismen und Korallen.

Ein wesentlicher Nachteil gegenüber geologischen Speichern sind die höheren Leckageraten: Selbst wenn

große Wassertiefen von mehr als 3000 m betrachtet werden (zu denen Deutschland keinen direkten Zugang hat und die überwiegend in internationalen Gewässern liegen) – in denen flüssiges CO_2 dichter ist als Meerwasser und daher bei unvollständiger Lösung im Meerwasser absinken und nicht an die Meeresoberfläche aufsteigen würde – erreicht ein nicht zu vernachlässigender Anteil des im Meerwasser gelösten CO_2 auf Zeitskalen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden mit der Ozeanzirkulation wieder die Meeresoberfläche (Orr et al. 2001; Reith et al. 2016). Eine Lagerung in Form von CO_2 -Gashydraten am Meeresboden würde die Zeitskala der CO_2 -Lösung aufgrund der schnellen Lösungskinetik von CO_2 -Hydraten im Meerwasser nur unwesentlich verlängern (Rehder et al. 2004). Im Nahfeld solcher CO_2 -Ablageorte entstünden zudem Regionen mit stark verringertem pH-Wert, d. h. einer starken Versauerung mit negativen Auswirkungen auf die benthische Fauna, die in weiten Teilen der Tiefsee nur sehr geringen pH-Schwankungen unterworfen ist (Tamburri et al. 2000; Seibel und Walsh 2001). Aktuell ist das Einleiten von CO_2 in die Wassersäule durch die Londoner Konvention und das Londoner Protokoll verboten (Leung et al. 2014).

35.2.2 Chemisch: Alkalinisierung

Einbringung von Alkalinität von außen

Alkalinität bezeichnet allgemein das Säurebindungsvermögen, was im Fall von Meerwasser insbesondere für die Speicherkapazität von Kohlensäure, also für CO_2 relevant ist. Das Einbringen von Alkalinität an der Meeresoberfläche führt zu einer Erhöhung der Aufnahme von atmosphärischem CO_2 in den Ozean.

Prinzipiell kommt eine Vielzahl von natürlichen oder künstlichen Alkalinitätsquellen infrage, ein Schwerpunkt liegt jedoch auf Kalk- oder Silikatgestein. Diese Gesteine sind alkalisch und geben bei Verwitterung (Reaktion des Gesteins mit Wasser und CO_2 , d. h. Kohlensäure) Magnesium- oder Kalziumionen ab, während CO_2 unter Bindung von Protonen (d. h. „Säure“) in Karbonat- und Bikarbonationen umgewandelt wird, wodurch der Ozean wiederum mehr atmosphärisches CO_2 aufnehmen kann. Der Prozess der Gesteinsverwitterung wirkt dabei auch der aktuell durch CO_2 -Emissionen forcierten Ozeanversauerung entgegen. Er findet auf der Erde seit Milliarden Jahren statt und entfernt das durch Vulkanismus natürlich freigesetzte CO_2 wieder aus der Atmosphäre – allerdings um mindestens einen Faktor von hundert langsamer als die aktuellen anthropogenen CO_2 -Emissionen. Eine erhöhte Verwitterung, sowohl an Land wie auch am Meeresboden, ist eine der wichtigsten natürlichen Reaktionen des Erdsystems auf erhöhte atmo-

sphärische CO_2 -Konzentrationen oder Temperatur. Zudem sind Silikat- und Kalkgestein praktisch unlimitiert in allen Erdteilen vorhanden.

Um eine möglichst große Reaktionsoberfläche des Gesteins mit CO_2 -haltigem Meerwasser zu erhalten, muss dieses sehr fein gemahlen werden. Bei vollständiger Verwitterung kann der Atmosphäre dann pro Tonne Silikatgestein etwa eine Tonne CO_2 entzogen werden. Bei Verwitterung von bereits kohlenstoffhaltigem Kalkstein ist die Effizienz nur ungefähr halb so groß. Unter den Silikaten wird derzeit vor allem Olivin als möglicherweise geeignetes Mineral untersucht, welches bei Lösung in Meerwasser Alkalinität freisetzt. Diese wird auch in Hinblick auf mögliche Nebenreaktionen untersucht (Griffioen 2017). Der Einsatz von Karbonaten ist erschwert durch die Tatsache, dass große Bereiche der Ozeanoberfläche bezüglich Kalziumkarbonat übersättigt sind (Jiang et al. 2015) und der Kalkstein sich daher nicht spontan im Meerwasser löst. Eine Ausnahme hiervon sind Meeresgebiete, in denen untersättigtes Wasser aus tieferen Schichten an die Meeresoberfläche tritt. Dies ist z. B. in Küstenauftriebsregionen oder aber in Becken mit starkem Wasseraustausch bis hin zur Meeresoberfläche innerhalb weniger Dekaden (z. B. Ostsee) möglich.

Ausnutzung benthischer Alkalinitätsquellen

Natürlich vorhandene anaerobe, d. h. sauerstofffreie Sedimente (und Gewässer) bieten einen Weg zu negativen CO_2 -Emissionen, wenn organisches Material in solchen Umgebungen oxidiert wird. Beim Ablauf dieser Prozesse wird der Umgebung Säure entzogen oder Base zugeführt, wodurch die CO_2 -Speicherkapazität, die Alkalinität, erhöht wird. Küstennahen, flachen Sedimenten kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da diese Sedimente starken landseitigen Einflüssen unterworfen sind und darüber hinaus in relativ direktem Kontakt zur Atmosphäre stehen. Zu den Oxidationsmitteln, die den Sauerstoff sukzessive ersetzen, gehört insbesondere Nitrat, das vor allem durch landwirtschaftliche Aktivitäten in massivem Überschuss in die Meeresumwelt freigesetzt wird (Eutrophierung) und zur Entstehung oder Ausweitung sauerstoffarmer oder -freier Zonen führen kann. Die Reduktion von Nitrat in anoxischen Umgebungen, die Denitrifizierung, verringert das Problem durch Abbau von Nitrat, erzeugt dabei Alkalinität und kommt bereits heute großtechnisch in Kläranlagen mit dem Ziel der Nitratentfernung zur Anwendung. In Küstenregionen kommen sowohl Nitrat als auch der benötigte organische Kohlenstoff im Überfluss vor, sodass geeignete Reaktoren zur Alkalinitätserhöhung durch Denitrifizierung denkbar sind.

Das Potenzial dieses Ansatzes lässt sich anhand zukünftiger Szenarien in der Landnutzung grob abschätzen. Bei einem in einigen Szenarien (beispielsweise dem *Shared Socioeconomic Pathway* SSP-5-8.5) (Riahi

et al. 2017) angenommenen jährlichen Bioenergiebedarf von 50 Mrd. t CO_2 , würde man pro Tonne gebundenem CO_2 20 kg Nitrat als Dünger benötigen (Abschätzung für Weizen, Palliere 2004), wovon ca. 40 % ungenutzt in die Küstenmeere ausgewaschen werden (Nevison et al. 2016). Aus Sichtweise des Karbonat-systems der Ozeane ergibt sich pro Tonne im Nitrat gebundenen Stickstoffs eine zusätzliche CO_2 -Speicherkapazität des Meerwassers von etwa 2,75 t CO_2 (Thomas et al. 2009). Die Denitrifizierung dieses Stickstoffs würde dann die CO_2 -Aufnahmekapazität des Ozeans um 1,1 Mrd. t CO_2 pro Jahr erhöhen. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der in diesem Zeitraum erforderlichen netto-negativen CO_2 -Emissionen (Gasser et al. 2015) und zeigt, dass dieser Ansatz von seinem Potenzial her betrachtet einen bedeutenden Beitrag zur Erzeugung der erforderlichen negativen CO_2 -Emissionen liefern kann. Es sollte hier betont werden, dass dieser Ansatz nicht zu erhöhtem Nährstoffeintrag aufruft, sondern in Analogie zu Kläranlagen bei geeigneter Skalierung einen Beitrag zur Behebung der Überdüngungsproblematik liefern könnte.

35.2.3 Biologische Eisendüngung

Ebenso wie Pflanzen an Land betreiben Algen im Ozean Fotosynthese und nehmen dabei im Meerwasser gelöstes CO_2 auf. Ein Teil der produzierten Biomasse sinkt in die Tiefe, bevor sie wieder CO_2 freisetzt. Netto erzeugt die marine Biologie so einen Kohlenstofftransport vom Oberflächenwasser, das in engem Austausch mit dem CO_2 der Atmosphäre steht, in den tiefen Ozean, die sogenannte biologische Kohlenstoffpumpe. In großen Gebieten des Weltozeans, insbesondere dem Südlichen Ozean, ist das Algenwachstum durch den Mikronährstoff Eisen limitiert (Martin 1990). Mehrere Feldexperimente haben gezeigt, dass die Zugabe von gelöstem Eisensulfat dort zu einer deutlichen Steigerung des Algenwachstums und der damit verbundenen CO_2 -Aufnahme führen kann (Boyd et al. 2007), wobei die biologische Produktion letztlich auch durch Licht, andere Nährstoffe und ökologische Effekte (Fraßdruck) begrenzt wird. Es wird geschätzt, dass bei kontinuierlicher Düngung des gesamten Südlichen Ozeans maximal etwa 4 Mrd. t CO_2 pro Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden könnten (Oschlies et al. 2010), wobei die Speicherung nicht permanent wäre, da das mit der biologischen Kohlenstoffpumpe in die Tiefe transportierte CO_2 mit der Ozeanzirkulation auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten wieder an die Meeresoberfläche gelangen würde (Siegel et al. 2021). Nebeneffekte der Düngung wären u. a. eine Verschiebung der Artengemeinschaft sowie eine verstärkte Sauerstoffzehrung durch bakterielle Zersetzungsprozesse der zusätzlich in die Tiefe exportierten Bio-

masse (Williamson et al. 2012). Außerdem ist das Algenwachstum im Ozean nur in den Gebieten durch Eisen limitiert, die vom Land entfernt und weit weg vom Kontakt mit eisenhaltigem Gestein oder Staubeinträgen sind. Das ist in deutschen Hoheitsgewässern nicht der Fall.

Aktuell ist die kommerzielle Anwendung von Eisendüngung durch die Londoner Konvention³ und das Londoner Protokoll⁴ verboten. Eine Düngung durch Makronährstoffe, insbesondere Stickstoff und Phosphor, die das Algenwachstum in den meisten Meeresgebieten limitieren, wäre theoretisch möglich (und wird billiger in Form von Eutrophierung in vielen Küstengebieten durch Einleitung von ungeklärten Abwässern aus Haushalten, Industrie und Landwirtschaft bereits realisiert, ► Abschn. 35.2.2), wird aber aufgrund des energieaufwendigen Herstellung großer Mengen von Düngemitteln nicht als plausibles Mittel zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre gesehen. Weiterhin würde, wie oben angedeutet, eine verstärkte „Düngung“ zu den bekannten und teils mit viel Aufwand behobenen Problemen der Eutrophierung führen, wie zum Beispiel Sauerstoffmangel.

Blue carbon

So wie marine Algen speichern auch marine Gefäßpflanzen große Mengen an Kohlenstoff in ihrer Biomasse. Hierbei handelt es sich in der gemäßigten Klimazone Deutschlands vor allem um Seegraswiesen unter Wasser, Salzmarschen und Seegraswiesen in Gezeitenökosystemen. In tropischen und subtropischen Gebieten kommen auch Mangroven in Betracht. Anders als die meisten Makroalgen wachsen diese Pflanzen auf Weichsedimenten, die aufgrund feiner Sedimentkorngrößen und hoher mikrobieller Aktivität ab Sedimenttiefen von wenigen Millimetern sauerstofffrei sind und Abbauprozesse von totem Pflanzenmaterial hemmen. Organisches Material, das sich in diesen Sedimenten ablagert, ist unter diesen anoxischen und salinaren Bedingungen über Jahrhunderte oder Jahrtausende stabil gespeichert. Der Kohlenstoff, der in Küstenökosystemen mit Vegetation abgelagert und gespeichert wird, wird allgemein als *blue carbon* bezeichnet. Pro Flächeneinheit können die Mengen an *blue carbon* um ein Mehrfaches höher liegen als die in anderen (terrestrischen) Gefäßpflanzenökosystemen gespeicherten CO₂-Äquivalente (McLeod et al. 2011), allerdings sind diese küstennahen Flächen klein im Vergleich zur Landoberfläche, sodass das globale Potenzial

auf wenige Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr begrenzt erscheint.

Vegetationsreiche Küstenökosysteme sind weit über ihre potenzielle Bedeutung für die Mitigation des Klimawandels hinaus relevant, da sie auch der lokalen Bevölkerung zahlreiche Ökosystemleistungen bieten. Der Schutz oder eine unterstützte Ausdehnung dieser Küstensysteme hat in der Regel vielfältige sozioökonomische Vorteile. Dennoch sind sie einer Vielzahl von Bedrohungen ausgesetzt, und im Verlauf der letzten Jahrzehnte sind weltweit große Teile ihrer ursprünglichen Fläche durch Verschmutzung, künstliche Küstenschutzmaßnahmen (Deiche, Buhnen, usw.), Landnutzungsänderung (Bau von Infrastruktur oder Tourismusanlagen, Aquakultur) und direkte Zerstörung (z. B. Holzgewinnung aus Mangroven) verloren. Infolge der Destabilisierung und damit verbundenen Belüftung des Sediments nach Zerstörung von *Blue-carbon*-Ökosystemen werden große Mengen von CO₂ (und anderen klimarelevanten Gasen) aus dem Sediment freigesetzt (Mareadie et al. 2013; Hamilton und Friess 2018; Salinas et al. 2020). Zudem gehen – v. a. nach Zerstörung von Mangroven – Kohlenstoffspeicher in der ober- und unterirdischen Biomasse der Vegetation verloren.

Der Schutz bestehender und etablierter Küstenökosysteme als CO₂-Speicher und Anbieter zahlreicher weiterer Ökosystemleistungen hat also allerhöchste Priorität. Degradierete Ökosysteme, die ihre CO₂-Speicherkapazität verloren haben, können in vielen Fällen durch Restaurierung wiederhergestellt werden – oft allerdings unter erheblichem Aufwand. Häufig erweisen sich diese Restaurierungsversuche an Küstenökosystemen allerdings nach kurzer Zeit als Fehlschlag (van Katwijk et al. 2016; Wodehouse und Rayment 2019). Zudem liefern auch nach erfolgreicher Restaurierung neu angelegte Ökosysteme nicht dieselben Ökosystemleistungen wie zuvor. Selbst wenn infolge der Degradierung der Ökosysteme nicht der gesamte gespeicherte CO₂-Bestand aus dem Sediment entlassen wird, sondern v. a. die oberen Dezimeter davon betroffen sind, und junge Anpflanzungen zur Wiederanreicherung von CO₂ in Pflanzenbiomasse und Sedimenten beitragen, brauchen junge Ökosysteme bis zu mehrere Jahrzehnte, bis sie die Speicherleistungen altgewachsener Bestände erreichen (Mangroven: Short et al. 2000; Elwin et al. 2019).

Statt Restauration mit dem Ziel, hohe Biodiversitäten zurückzugewinnen, ohne aber Ökosystemleistungen im Blick zu haben, bietet das Konzept des Ökosystemdesign (Zimmer 2018) eine Alternative, die sich auf die Erbringung von benötigten Ökosystemleistungen fokussiert. Eine Weiterführung dieses Konzepts, insbesondere im Zusammenhang mit der Speicherung von *blue carbon* als Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels, schließt die Option ein, durch geringfügige strukturelle Veränderungen Umwelt-

3 ► <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/London-Convention-Protocol.aspx>

4 ► <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/LDC-LC-LP.aspx>

bedingungen so zu beeinflussen, dass Küstenökosysteme an Orten implementiert werden können, die ihnen – z. B. aufgrund von Wellen- oder Gezeiteneinwirkungen – bislang nicht als Lebensraum zur Verfügung standen, was häufig auch zu einer Erhöhung der Biodiversität führen kann.

35.3 Fazit

Sowohl geologische als auch marine Speicher haben das theoretische Potenzial für die Aufnahme von CO₂ in klimatisch wirksamen Größenordnungen von global gesehen Milliarden Tonnen pro Jahr. Für Deutschland erscheint die geologische Speicherung von CO₂ im tiefen Untergrund sowohl unter Land als auch unter der Nordsee als vielversprechende Option mit einem Speicherpotenzial, das einen signifikanten Beitrag für das Erreichen der Klimaziele darstellen kann. Seegrasswiesen und Salzmarschen können einen Beitrag leisten, der aufgrund der verfügbaren Flächen allerdings deutlich kleiner ist. Ozeandüngung und Injektion von CO₂ ins Tiefenwasser spielen für deutsche Hoheitsgewässer keine Rolle und wäre nur in derzeit nicht absehbaren internationalen Aktivitäten denkbar. Alkalinisierung erscheint aus theoretischen Betrachtungen heraus als vielversprechende Option, sowohl unter Ausnutzung benthischer Alkalinitätsquellen als auch der Einbringung alkalischer Substanzen im deutschen Hoheitsgebiet. Hier gibt es erheblichen Forschungsbedarf, der in aktuellen Forschungsprojekten adressiert wird, um das Potenzial und die Risiken dieser möglichen Option zu verstehen. Umweltverträglichkeit, Permanenz der Speicherung sowie infrastrukturelle und rechtliche Voraussetzungen, gesellschaftliche Akzeptanz und wirtschaftliche Realisierbarkeit bedürfen für alle Ansätze weiterer Klärung, bevor hieraus realisierbare Optionen werden können. Dazu besteht zum einen dringender multidisziplinärer Forschungsbedarf, zum anderen aber auch die Notwendigkeit einer breiten gesellschaftlichen Debatte über konkrete Pfade zum Erreichen der zugesagten und dringend einzuhaltenden Klimaziele, die aus heutiger Sicht nicht mehr ohne einen Einsatz von Maßnahmen zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre realisierbar sind.

35.4 Kurz gesagt

Es gibt eine Reihe von geologischen und marinen Optionen zur Entnahme und Speicherung von CO₂, die über die bisher in Deutschland betrachteten terrestrischen Verfahren hinaus Beiträge leisten können, um die versprochenen Klimaziele und insbesondere die Klimaneutralität zu erreichen. Methoden reichen von der physischen Lagerung von CO₂ über biologische Ver-

fahren, die die fotosynthetische Aufnahme von CO₂ ausnutzen, bis hin zu chemischen Verfahren, die auf Säure-Base-Reaktionen und der Neutralisation der im Meerwasser gelösten Kohlensäure beruhen. Viele Methoden erscheinen vielversprechend, alle sind jedoch weit von der praktischen Umsetzung entfernt und Wissenschaft und Gesellschaft müssen in einem transparenten Dialog klären, unter welchen Umständen welche Verfahren realisierbare Optionen werden können.

Literatur

- Alt JC, Teagle DAH (1999) The uptake of carbon during alteration of ocean crust. *Geochim Cosmochim Acta* 63:1527–1535
- Archer D, Brovkin V (2008) The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂. *Clim Chang* 90(3):283–297
- Banks J, Poulette S, Grimmer J, Bauer F, Schill, E (2021) Geochemical changes associated with high-temperature heat storage at intermediate depth: thermodynamic equilibrium models for the DeepStor site in the Upper Rhine Graben, Germany. *Energies* 14(19), 6089
- Boden TA, Marland G, Andres RJ (2009) Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA
- Bottner C, Haeckel M, Schmidt M, Berndt C, Vielstadte L, Kutsch JA, Karstens J, Weiss T (2020) Greenhouse gas emissions from marine decommissioned hydrocarbon wells: leakage detection, monitoring and mitigation strategies. *Int J Greenh Gas Control* 100:16
- Boyd PW, Jickells T, Law CS et al (2007) Mesoscale iron enrichment experiments 1993–2005: Synthesis and future directions. *Science* 315(5812):612
- Bundesregierung (2020) Climate action programm 2030. ► <https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/climate-action>
- Deutscher Bundestag (2018) Wissenschaftliche Dienste (WD) 8 – 3000 – 055/18
- ECO₂-consortium (2015) ECO₂ final publishable summary report. ► <https://www.eco2-project.eu/>
- Elwin A, Bukoski JJ, Jintana V, Robinson EJZ, Clark JM (2019) Preservation and recovery of mangrove ecosystem carbon stocks in abandoned shrimp ponds. *Sci Rep* 9:18275
- Fyson CL, Baur S, Gidden M, Schleussner C-F (2020) Fair-share carbon dioxide removal increases major emitter responsibility. *Nat Clim Chang* 10(9):836–841
- Gasser T, Guivarch C, Tachiiri K, Jones CD, Ciais P (2015) Negative emissions physically needed to keep global warming below 2 °C. *Nat Commun* 6
- Global CCS Institute (2019) Global status of CCS, 24
- Griffioen J (2017) Enhanced weathering of olivine in seawater: the efficiency as revealed by thermodynamic scenario analysis. *Sci Total Environ* 575:536–544
- Gruber N, Clement D, Carter BR et al (2019) The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science* 363(6432): 1193
- Hamilton SE, Friess DA (2018) Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nat Clim Chang* 8:240–244
- IPCC, Allen M et al (2018) Global warming of 1.5 °C, summary for policymakers. IPCC
- Israelsson PH, Chow AC, Adams EE (2009) An updated assessment of the acute impacts of ocean carbon sequestration by direct injection. *Energy Procedia* 1(1):4929–4936

- Jiang L-Q, Feely RA, Carter BR, Greeley DJ, Gledhill DK, Arzayus KM (2015) Climatological distribution of aragonite saturation state in the global oceans, *Global Biogeochem. Cycles* 29:1656–1673. ► <https://doi.org/10.1002/2015GB005198>
- Knopf S, May F (2017) Comparing methods for the estimation of CO₂ storage capacity in saline aquifers in Germany: regional aquifer based vs. structural trap based assessments. *Energy Procedia* 114:4710–4721
- Knopf S, May F, Müller C, Gerling JP (2010) Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfr* 60(4):76–80
- Le Quéré C, Andres RM, Friedlingstein P et al (2018) Global carbon budget 2018. *Earth Syst Sci Data* 10(4):2141–2194
- Leung DY, Caramanna G, Maroto-Valer MM (2014) An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 39:426–443
- Lüth S, Hennings J, Ivandic M, Juhlin C, Kempka T, Norden B, Rippe D, Schmidt-Hattenberger C (2020) Geophysical monitoring of the injection and postclosure phases at the Ketzin pilot site. In: Kasahara J, Zhdanov MS, Mikada H (Hrsg) *Active geophysical monitoring*. Elsevier, S 523–561. ► <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102684-7.00025-X>
- Macreadie PI, Hughes AR, Kimbro DL (2013) Loss of ‘blue carbon’ from coastal salt marshes following habitat disturbance. *PLoS One* 8(7):e69244
- Marchetti C (1977) On geoengineering and the CO₂ problem. *Clim Chang* 1(1):59–68
- Martens S, Möller F, Streibel M, Liebscher A, Group TK (2014) Completion of five years of safe CO₂ injection and transition to the post-closure phase at the Ketzin pilot site. *Energy Procedia* 59:190–197
- Martin JH (1990) Glacial-interglacial CO₂ change: the iron hypothesis. *Paleoceanography* 5(1):1–13
- Matter JM, Broecker WS, Gislason SR, Gunnlaugsson E, Oelkers EH, Stute M, Sigurdardóttir H, Stefansson A, Alfreðsson HA, Aradóttir ES, Axelsson G (2011) The CarbFix Pilot Project—storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia* 4:5579–5585
- McLeod E, Chmura GL, Bouillon S et al (2011) A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ* 9:552–560
- Nevison C, Hess P, Riddick S, Ward D (2016) Denitrification, leaching, and river nitrogen export in the Community Earth System Model. *J Adv Model Earth Syst* 8:272–291. ► <https://doi.org/10.1002/2015MS000573>
- Orr JC, Aumont O, Yool A, Plattner G-K, Joos F, Maier-Reimer E, Weirig M-F, Schlitzer R, Caldeira K, Wicket M, Matear R (2001) Ocean CO₂ sequestration efficiency from 3-D ocean model comparison
- Oschlies A, Koeve W, Rickels W, Rehdanz K (2010) Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization. *Biogeosciences* 7(12):4017–4035
- Pallière C (2004) OECD, S 223–227
- Pozo C, Galán-Martín Á, Reiner DM, Mac Dowell N, Guillén-Gosálbez G (2020). Equity in allocating carbon dioxide removal quotas. *Nat Clim Chang* 1–7
- Raza A, Gholami R, Rezaee R, Rasouli V, Rabiei M (2019) Significant aspects of carbon capture and storage – a review. *Petroleum* 5(4):335–340
- Rehder G, Kirby SH, Durham WB, Stern LA, Peltzer ET, Pinkston J, Brewer PG (2004) Dissolution rates of pure methane hydrate and carbon-dioxide hydrate in undersaturated seawater at 1000-m depth. *Geochim Cosmochim Acta* 68(2):285–292
- Reith F, Keller DP, Oschlies A (2016) Revisiting ocean carbon sequestration by direct injection: a global carbon budget perspective. *Earth Syst Dyn* 7(4):797–812
- Reith F, Koeve W, Keller DP, Getzlaff J, Oschlies A (2019) Meeting climate targets by direct CO₂ injections: what price would the ocean have to pay? *Earth Syst Dyn* 10(4):711–727
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E et al (2017) The shared socio-economic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Glob Environ Chang.* ► <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Salinas C, Duarte CM, Lavery PS, Masque P, Arias-Ortiz A, Leon AX, Callaghan D, Kendrick GA, Serrano O (2020) Seagrass losses since mid-20th century fuelled CO₂ emissions from soil carbon stocks. *Glob Chang Biol* 26(9):4772–4784
- Schmidt-Hattenberger C et al (2019) Schlussbericht Projekt COMPLETE – Forschungsprojekt COMPLETE, Pilotstandort Ketzin – Erster Abschluss des kompletten Lebenszyklus eines CO₂-Speichers im Pilotmaßstab mit Schwerpunkt auf Überwachung bei Stilllegung (CO₂ post-injection monitoring and post-closure phase at the Ketzin pilot site), Sonderprogramm Geotechnologien: Berichtszeitraum: 01.01.2014–31.12.2017
- Short FT, Burdick DM, Short CA, Davis RC, Morgan PA (2000) Developing success criteria for restored eelgrass, salt marsh and mud flat habitats. *Ecol Eng* 15:239–252
- Seibel BA, Walsh PJ (2001) Potential impacts of CO₂ injection on deep-sea biota. *Science* 294(5541):319
- Siegel D, DeVries T, Doney S, Bell T (2021) Assessing the sequestration time scales of some ocean-based carbon dioxide reduction strategies. *Environ Res Lett.* ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0be0> (im Druck)
- Snæbjörnsdóttir SÓ, Sigfússon B, Marieni C, Goldberg D, Gislason SR, Oelkers EH (2020) Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nat Rev Earth Environ* 1–13
- Tamburri MN, Peltzer ET, Friederich GE, Aya I, Yamane K, Brewer PG (2000) A field study of the effects of CO₂ ocean disposal on mobile deep-sea animals. *Mar Chem* 72(2):95–101
- Thomas H, Schiettecatte L-S, Suykens K, Koné YJM, Shadwick EH, Prowe AEF, Bozec Y, de Baar HJW, Borges AV (2009) Enhanced ocean carbon storage from anaerobic alkalinity generation in coastal sediments. *Biogeosciences* 6:267–274
- UBA (2020) Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. ► <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>
- van Katwijk MM, Thorhaug A, Marbà N, Orth RJ, Duarte CM, Kendrick GA, Althuisen IHJ, Balestri E, Bernard G, Cambridge ML, Cunha A, Durance C, Giesen W, Han Q, Hosokawa S, Kiswara W, Komatsu T, Lardicci C, Lee K-S, Meinesz A, Nakaoka M, O’Brien KR, Paling EI, Pickerell C, Ransijn AMA, Verduin JJ (2016) Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *J Appl Ecol* 53:567–578
- Vangkilde-Pedersen T (2009) EU GeoCapacity, 2009. Assessing Europe capacity for geological storage of carbon dioxide. D16 WP2 Storage Capacity, S 170
- Williamson P, Wallace DWR, Law CS, Boyd PW, Collos Y, Croot P, Denman K, Riebesell U, Takeda S, Vivian C (2012) Ocean fertilization for geoengineering: a review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Saf Environ Prot* 90(6):475–488
- Willscher B (2007) Die CO₂-Speicherkapazität in salinen Aquiferen in der deutschen Nordsee. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Wodehouse DCJ, Rayment MB (2019) Mangrove area and propagule number planting targets produce sub-optimal rehabilitation and afforestation outcomes. *Estuar Coast Shelf Sci* 91–102
- Zimmer M (2018) Ecosystem design: when mangrove ecology meets human needs. In: Makowski C, Finkl CW (Hrsg) *Threats to mangrove forests: hazards, vulnerability and management*. Springer, S 367–376

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

