

8 Kohlendioxid verpressen tief unter dem Meer

> Wenn Kohlendioxid in Industrieprozessen abgeschieden oder direkt aus der Atmosphäre entnommen wird, stellt sich auch die Frage nach einem geeigneten Speicherort. Da eine unterirdische Kohlendioxidspeicherung an Land nicht risikolos ist und Proteste der Anwohnenden hervorruft, suchen Verantwortliche vermehrt nach Speichermöglichkeiten tief unter dem Meer. Die Technik dazu existiert bereits und wird seit Jahrzehnten in Pilotprojekten eingesetzt.



Gasspeicherung in Sandsteinschichten und Basaltgestein

> Als Kohlendioxidspeicher bieten sich Gesteinsschichten in 1000 bis 4000 Meter Tiefe unter dem Meer an. Das können erschöpfte Erdöl- oder Erdgasfelder sein oder Gesteine, deren Porenraum mit Salzwasser gefüllt ist. Erforscht werden derzeit zwei Speicherverfahren: Beim ersten wird Kohlendioxid in tief liegende Sandsteinformationen verpresst – ein Ansatz, der in der Nordsee bereits praktiziert wird. Im zweiten Verfahren wird das Gas in die reaktionsfreudige, poröse obere Basaltschicht der Ozeankruste eingeleitet, in der Hoffnung, dass es dort zeitnah mineralisiert.

Kohlendioxidabscheidung: Eine Technologie mit Entsorgungsproblem

Theoretisch ließen sich unvermeidbare Restemissionen ausgleichen, indem der Mensch Kohlendioxid direkt aus der Atmosphäre entnimmt – und zwar im selben Umfang, wie er zuvor das Treibhausgas freigesetzt hat. Die für eine solche Entnahme eingesetzten Technologien werden unter dem Begriff Direct Air Capture (DAC) zusammengefasst. Sie alle sind jedoch mit der Anforderung verbunden, dass das entnommene Kohlendioxid anschließend weiterverarbeitet oder irgendwo sicher eingelagert werden muss. Gleiches gilt für Kohlendioxid, welches in Stahl- und Zementwerken, Müllverbrennungsanlagen und anderen großen Emissionsquellen (oft Punktquellen genannt) abgeschieden wird, um seine Freisetzung in die Atmo-

sphäre zu verhindern. Fachleute bezeichnen diese technologische Option zur Vermeidung von Kohlendioxidemissionen als Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (englisch: Carbon Capture and Storage), kurz CCS.

CCS soll nicht nur eingesetzt werden, um die Treibhausgasemissionen der Schwerindustrie aus fossilen Quellen zu reduzieren. Die Technologie ist auch ein zentraler Baustein der Energie- und Wärmeabgewinnung in Biomasse-Heizkraftwerken mit Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (BECCS), einer der bisher wichtigsten landbasierten Kohlendioxid-Entnahmemethoden. Ohne CCS wäre sie ebenso undenkbar wie ein Einsatz von Verfahren zur direkten Kohlendioxid-Entnahme aus der Luft oder dem Wasser mit anschließender Speicherung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS).

Zum Anfang des Jahres 2023 waren weltweit 35 Anlagen zur Abscheidung oder Entnahme von Kohlendioxid in Betrieb. Ihr gemeinsames Entnahmepotenzial betrug 45 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Das entsprach ziemlich genau jener Menge an Kohlendioxid, die Unternehmen in Deutschland im Jahr 2021 im Zuge ihrer Industrieprozesse ausgestoßen haben. Weitere Entnahmeanlagen werden derzeit geplant oder gebaut. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) sollen Ankündigungen zufolge bis zum Jahr 2030 mehr als 200 neue Anlagen zur Abscheidung oder Entnahme von Kohlendioxid den Betrieb aufnehmen. Deren zusätzliches Entnahmepotenzial addiert sich auf mehr als 220 Millionen Tonnen Kohlendioxid.

Es gibt mittlerweile eine Reihe technischer Verfahren, mit denen Kohlendioxid aus Gasströmen abgeschieden werden kann. Die am besten erprobten und am weitesten verbreiteten Abscheidetechnologien sind die chemische Absorption und die physikalische Abscheidung. Bei der chemischen Absorption reagiert das Kohlendioxid mit einem chemischen Bindemittel, von dem es anschließend

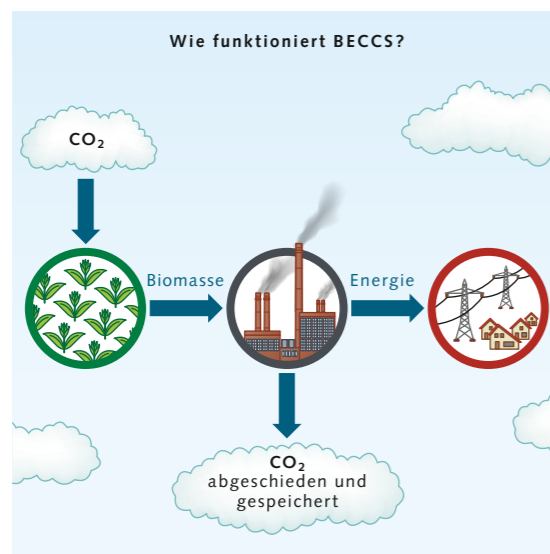
mit viel Energieaufwand wieder getrennt werden muss. Bei der physikalischen Abscheidung hingegen lagert sich das Kohlendioxid entweder auf einer festen Oberfläche an (zum Beispiel auf Aktivkohle) – oder es löst sich in einem flüssigen Lösungsmittel.

Sowohl chemische als auch physikalische Abscheidungsverfahren kommen bei der Erdgasförderung zum Einsatz, wo derzeit rund zwei Drittel des weltweit abgetrennten Kohlendioxids gewonnen werden. Vielerorts enthält das aus dem Untergrund geförderte Erdgas nämlich nicht nur den Energieträger Methan, sondern auch Kohlendioxid zu einem Anteil von weniger als drei Prozent bis zu maximal 80 Prozent – Letzteres allerdings nur in seltenen Fällen. Dieses Kohlendioxid muss abgetrennt werden, bevor das Erdgas als nahezu reines Methan in Pipelines eingespeist werden darf. Wird dieses Gas später verbrannt, entstehen abermals Kohlendioxidemissionen.

Abscheidungsanlagen werden vereinzelt aber auch schon in anderen emissionsintensiven Industrieprozessen eingesetzt, so zum Beispiel bei der Energie- und Wärmeabgewinnung aus fossilen Brennstoffen und aus Biomasse, bei der Düngemittel- und Stahlherstellung, in Raffinerien sowie bei der Müllverbrennung. Benötigt wird eine Kohlendioxidabscheidung langfristig zudem bei der Gewinnung von blauem Wasserstoff sowie bei der Herstellung des Biokraftstoffs Bioethanol. Größere Mengen Kohlendioxid werden künftig auch durch den zunehmenden Einsatz von Direct-Air-Capture-Verfahren anfallen. Im Jahr 2024 soll die erste DAC-Anlage der Welt in Betrieb gehen, die der Atmosphäre pro Jahr mehr als eine Million Tonnen Kohlendioxid entnehmen soll.

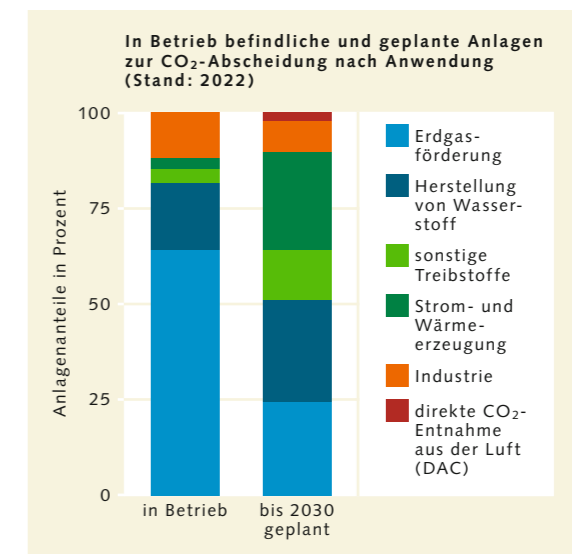
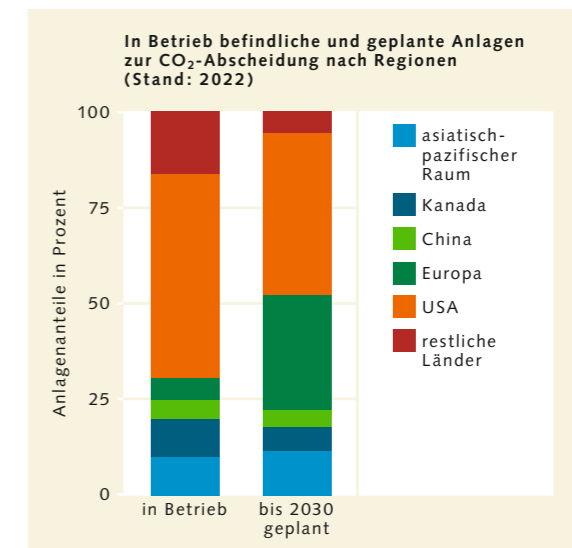
Hinzu kommt die Schlüsselrolle, die CCS für eine Dekarbonisierung der Zement- und Kalkindustrie zugeschrieben wird. Bei der Produktion von einer Tonne Zementklinker (Kalziumoxid), dem Hauptinhaltsstoff von Zement, entstehen unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen etwa 0,8 Tonnen Kohlendioxid als Prozessemission. Sollen diese riesigen Emissionen der Zement- und Kalkindustrie vermieden werden – global sind es jährlich über zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid –, muss nicht nur der Zementklinkerbedarf drastisch reduziert werden. Es gilt auch, die schwer vermeidbaren Emissionen aufzufangen, das Gas dauerhaft einzulagern oder aber es sinnvoll weiterzunutzen.

Prozessemissionen
Als „Prozessemission“ wird die Freisetzung von Treibhausgasen bezeichnet, die nicht aus dem Einsatz fossiler Brenn- und Rohstoffe für die Energieerzeugung resultiert, sondern aus der verfahrensbedingten Nutzung kohlenstoffhaltiger Ausgangsstoffe bei der Produktion. In Deutschland entstehen Prozessemissionen vor allem in der Glas-, Kalk- und Zementindustrie. Sie machen ein Viertel der Industrieemissionen aus.



8.1 > Bei BECCS wird Pflanzenmaterial zur Strom- oder Wärmeabgewinnung genutzt. Dadurch frei werdendes CO₂ wird abgetrennt und gespeichert oder dauerhaft weiterverarbeitet.

Der norwegische Zementhersteller Norcem installiert aktuell die weltweit erste Zement-CCS-Anlage in seiner Fabrik in Brevik. Sie soll im Jahr 2024 den Betrieb aufnehmen und jährlich 400 000 Tonnen Kohlendioxid abscheiden. Das Gas soll anschließend verflüssigt und per Schiff zu einem Kohlendioxid-Terminal des „Northern Lights“-Projektes an der westnorwegischen Küste transportiert werden. Von dort wird das Flüssiggas dann über



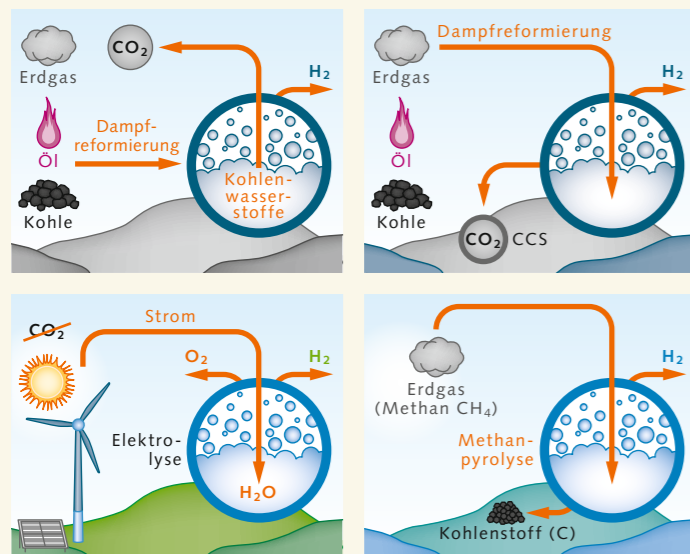
8.2 und 8.3 > Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxid sind aktuell vor allem in den USA in Betrieb und werden vornehmlich bei der Erdgasförderung eingesetzt.

Die Farben des Wasserstoffs

Wasserstoff kann auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Die gängigste Methode ist derzeit die Dampfreformierung, bei der Erdgas in Kohlendioxid und Wasserstoff zerlegt wird. Entlässt man das Kohlendioxid anschließend in die Atmosphäre, entstehen Treibhausgasemissionen und der Wasserstoff wird als „grau“ bezeichnet. Wird das Kohlendioxid hingegen gespeichert oder aber weiterverarbeitet, darf der Wasserstoff als „blau“ bezeichnet werden. Sowohl grauer als auch blauer Wasserstoff werden für industrielle Prozesse und die Stromproduktion eingesetzt.

Blauer Wasserstoff soll langfristig durch „grünen“ Wasserstoff ersetzt werden. Dieser wiederum wird durch Elektrolyse gewonnen, das heißt, Wasser wird mithilfe von elektrischem Strom in seine molekularen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Stammt der dazu verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen, ist die Wasserstoffproduktion klimaneutral und der gewonnene Wasserstoff wird als „grüner“ Wasserstoff bezeichnet.

Eine weitere Option, Wasserstoff klimaneutral herzustellen, ist die Methanpyrolyse mit Energie aus erneuerbaren Quellen. Dabei wird Erdgas (Methan) in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Fester Kohlenstoff ist ein Granulat, das zum Beispiel in alten Bergwerkstollen sicher gelagert und später wiederverwendet werden kann. Der durch Methanpyrolyse gewonnene klimaneutrale Wasserstoff wird als „türkiser“ Wasserstoff bezeichnet.



8.4 > Die vier Methoden der Wasserstoffherstellung unterscheiden sich im Ausgangsmaterial, in der Energiequelle, in den erforderlichen Arbeitsschritten und schlussendlich in ihrer Emissionsbilanz.

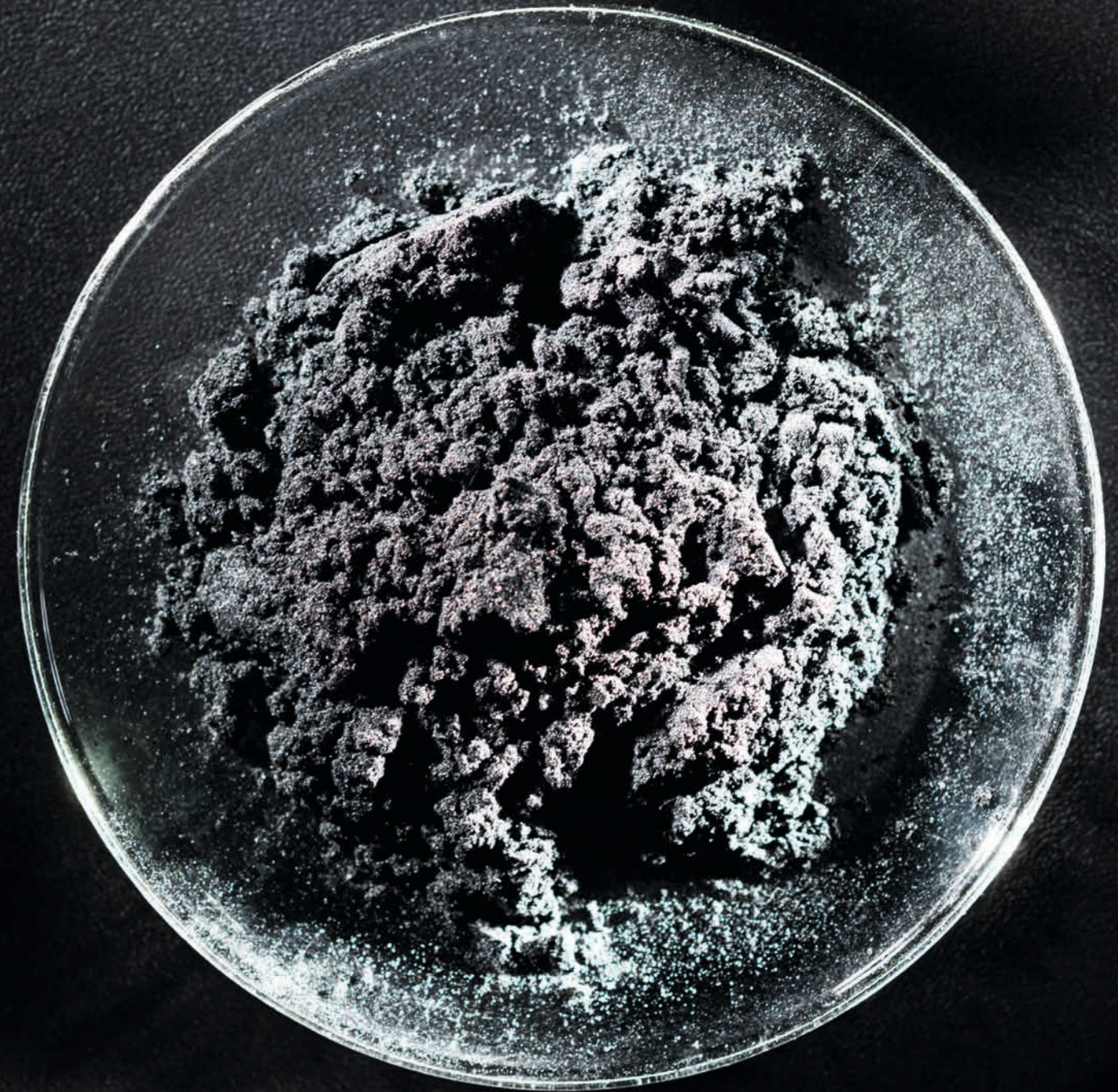
eine Pipeline 100 Kilometer weit auf die Nordsee geleitet und zum Schluss in eine Sandsteinformation 2600 Meter tief unter dem Meeresboden verpresst. CCS-Projekte in großem Maßstab planen zudem Zementhersteller in den USA und Großbritannien.

Angesichts der ambitionierten Einsatzpläne für Anlagen zur Abscheidung und Entnahme von Kohlendioxid müssen weltweit auch neue unterirdische Speicherkapazitäten erschlossen werden. Hunderte solcher Erschließungsprojekte befinden sich derzeit in Planung. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht deshalb davon aus, dass ab dem Jahr 2030 mehr als 420 Millionen Tonnen abgeschiedenes Kohlendioxid pro Jahr im tiefen Untergrund eingelagert werden können. Diese Speicherkapazität entspricht ungefähr jener Menge Kohlendioxid, die nach derzeitigen Schätzungen im Jahr 2030 abgeschieden werden kann und anschließend sicher eingelagert werden muss.

Die Kohlendioxidspeicherung im Untergrund

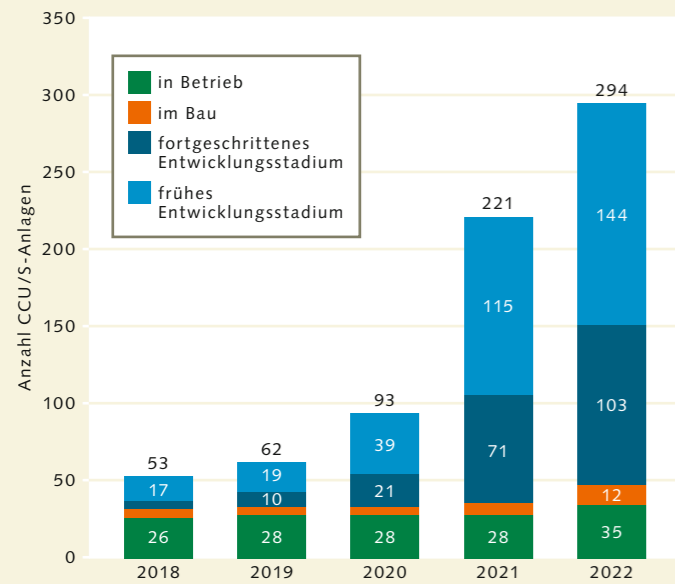
Als Kohlendioxidspeicher bietet sich vor allem der Porenraum von Gesteinsschichten in 1000 bis 4000 Meter Tiefe an. Das können einerseits erschöpfte Erdöl- oder Erdgasfelder sein oder Gesteine, deren Porenraum mit Salzwasser gefüllt ist. Um als Speicher dienen zu können, müssen diese Gesteinsschichten jedoch von einer undurchlässigen Deck- oder Barrierschicht überlagert werden. Diese besteht in der Regel aus feinem Ton- oder Salzgestein, welches ein Entweichen des eingelagerten Kohlendioxids aus dem Speichergestein verhindern soll.

Ob das immer gelingt, hängt von den lokalen geologischen Bedingungen ab. In Algerien, wo die Erdölkonzern BP und Statoil im Jahr 2004 begannen, Kohlendioxid aus der Erdgasförderung in 1,9 Kilometer Tiefe zu verpressen, stimmten diese nicht. Sieben Jahre nach Beginn des „In Salah“-CCS-Projektes – die Betreiber hatten bis dahin 3,8 Millionen Tonnen Kohlendioxid verpresst – stellten die Konzerne die Arbeiten ein: Geophysikalische und geochemische Kontrollmessungen hatten den Verdacht erhärtet, eingeleitetes Kohlendioxid könnte durch druckbedingte Risse und Störungen im Untergrund aus dem Speichergestein in die 300 Meter dicke Barrierschicht aufsteigen. Das Leckagerisiko war zu groß.



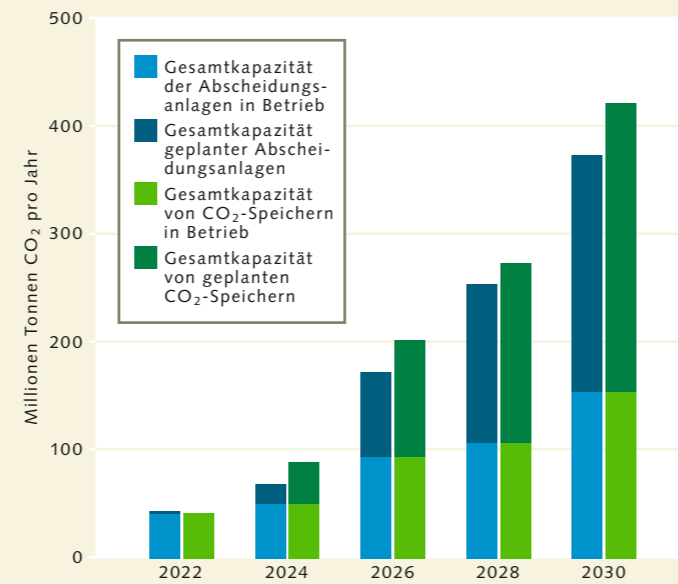
8.5 > Hochreines Kohlenstoffpulver entsteht, wenn Methan (Erdgas) bei der Pyrolyse auf über 1000 Grad Celsius erhitzt und in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff aufgespalten wird. Das Pulver wird für die Herstellung vieler Produkte benötigt: von modernen Bau- und Konstruktionswerkstoffen bis hin zu Hightech-Anwendungen wie Energiespeicher.

Entwicklung der Projektanzahl zur CO₂-Abscheidung von 2018 bis 2022



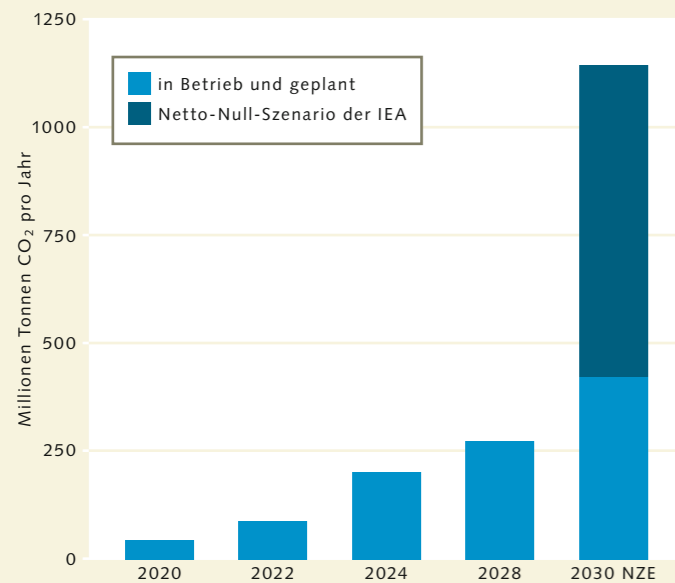
8.6 > Die Zahl der weltweit in Planung, Bau oder Betrieb befindlichen Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxid ist im Zeitraum von 2018 bis 2022 kontinuierlich angestiegen.

Vergleich der aktuellen und geplanten CO₂-Abscheidungs- und -Speicherkapazitäten für die Jahre 2022 bis 2030 (Stand: September 2023)



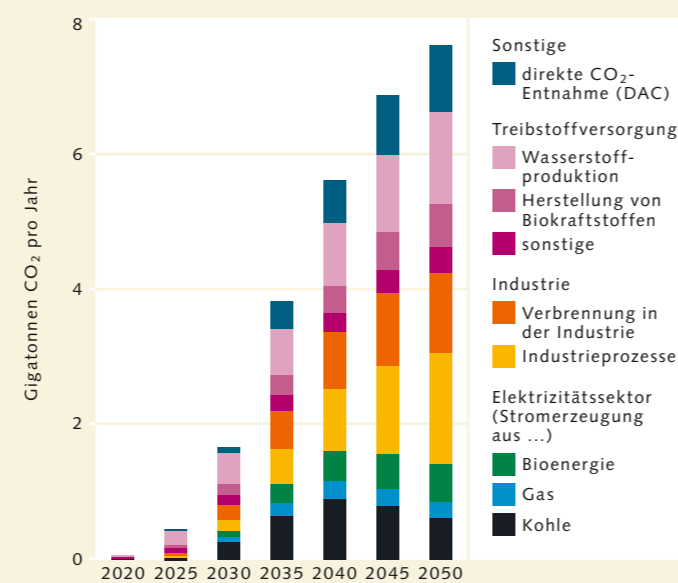
8.7 > Deutlich zugenommen hat auch die Zahl der geplanten Erschließungsprojekte für geologische Speicher. Prognosen zufolge stehen im Jahr 2030 ausreichend Speicherkapazitäten für abgeschiedenes CO₂ zur Verfügung.

Aktuelle und geplante CO₂-Speicherkapazität in den Jahren 2020 bis 2030 im Vergleich zum Netto-Null-Szenario (NZE) der Weltenergieagentur (IEA) (Stand: September 2023)



8.8 > Groß ist aber die Diskrepanz zwischen den geplanten und in Betrieb befindlichen CO₂-Speicherkapazitäten und jenen, die nach IEA-Berechnungen bereits im Jahr 2030 für ein Netto-Null-Szenario benötigt würden.

Globale CO₂-Abscheidung in den Jahren 2020 bis 2030 im Netto-Null-Szenario (NZE) der Weltenergieagentur (IEA)



8.9 > Nach Berechnung der IEA müssen im Jahr 2050 schätzungsweise 7,6 Milliarden Tonnen CO₂ abgeschieden werden – darunter rund 40 Prozent energie- und prozessbezogene Emissionen des Industriesektors.



8.10 > Diese Anlage scheidet Kohlendioxid aus der Umgebungsluft ab und stellt daraus einen Treibstoff her. Sie wurde vom kanadischen Unternehmen Carbon Engineering entwickelt, welches auch am Bau erster großer DAC-Anlagen in den USA beteiligt ist.

Die Fachleute haben jedoch aus dem Debakel gelernt und einige der damals angewandten Messmethoden in ihr Manual relevanter Vorerkundungs- und Überwachungsmethoden für geologische Kohlendioxidspeicher übernommen. Werden heutzutage bei der Kohlendioxid-Verpressung alle Druckgrenzwerte eingehalten, verbleiben in geeigneten Gesteinsformationen mindestens 99 Prozent des eingeleiteten Kohlendioxids. Bekannt ist allerdings auch, dass im Zuge der Einlagerung von Kohlendioxid bestimmte geotechnische Risiken zunehmen. So können Druckveränderungen im Untergrund Erdbeben auslösen oder dazu führen, dass sich an Land die Erdoberfläche anhebt. Denkbar ist außerdem, dass infolge einer Einlagerung von Kohlendioxid Porenwasser aus dem tiefen Untergrund aufsteigt und grundwasserführende Schichten versalzen oder verschmutzen könnte.

Aus diesen Gründen stoßen Pläne, abgeschiedenes Kohlendioxid an Land zu verpressen, vor allem in dicht besiedelten Regionen auf Ablehnung und rufen Proteste der lokalen Bevölkerung hervor. Neben der fehlenden öffentlichen Akzeptanz trugen in der Vergangenheit aller-

dings auch die hohen Kosten sowie der erhebliche Energieaufwand für eine Kohlendioxidabscheidung dazu bei, dass entsprechende Verfahren bisher nur in relativ wenigen Industrieprojekten in großem Maßstab angewendet wurden.

Eine umstrittene Methode im Aufwind

Seit Kurzem findet jedoch ein Umdenken in Politik und Wirtschaft statt: Unter dem Druck, die eigenen Emissionen tatsächlich zu reduzieren, planen immer mehr Staaten und Unternehmen einen Einsatz von CCS. Die US-amerikanische Regierung beispielsweise hat in ihrem Infrastrukturgesetz vom November 2021 mehr als zwölf Milliarden US-Dollar eingeplant, welche für CCS-Projekte und dazugehörige Aktivitäten ausgegeben werden dürfen. Davon sind 2,5 Milliarden US-Dollar für die Speicher-suche und -validierung vorgesehen; acht Milliarden US-Dollar können in die Entwicklung von Wasserstoff-produktionsstätten fließen, auch in solche für blauen Wasserstoff; und mehr als 200 Millionen US-Dollar will das

Kohlendioxid-Nutzung: Neue Ideen mit dem Langfristziel einer Kreislaufwirtschaft

Abgeschiedenes Kohlendioxid kann entweder direkt weiterverwendet werden oder muss verschiedene biologische oder chemische Prozesse durchlaufen, bevor es als Ausgangsstoff oder Zutat für die Herstellung verschiedener Produkte benutzt werden kann (englisch: Carbon Capture and Utilisation, CCU). Aktuell werden nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) weltweit jährlich etwa 230 Millionen Tonnen Kohlendioxid auf direkte Weise eingesetzt. Knapp 130 Millionen Tonnen werden verwendet, um synthetischen Harnstoff für Düngemittel herzustellen. Schätzungsweise 80 Millionen Tonnen verpressen erdölfördernde Konzerne im Untergrund, um Erdölvorkommen schneller und möglichst umfassend abzubauen (englisch: Enhanced Oil Recovery). Das restliche Kohlendioxid kommt in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie zum Einsatz oder wird in Gewächshäuser eingeleitet, um das Wachstum der Pflanzen zu steigern. Außerdem kann Kohlendioxid als Lösch- oder Kältemittel eingesetzt werden.

Relativ neu sind Überlegungen, abgeschiedenes Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle zu nutzen und daraus synthetische Kraftstoffe für den Schiffs- und Flugverkehr, kohlenstoffbasierte Grundstoffe für die Chemieindustrie oder aber Kunst- und Bauzusatzstoffe herzustellen. Gelingen dies im großen Maßstab, könnten kohlenstoffhaltige Produkte aus abgeschiedenem Kohlendioxid die bisher verwendeten Stoffe und Materialien aus fossilem Kohlenstoff ablösen. Das Endziel dieser Entwicklung wäre, eine Kohlenstoff-Wertschöpfungskette und -Kreislaufwirtschaft zu etablieren, in denen Kohlenstoff aus Kohle, Erdöl oder Erdgas nicht mehr benötigt würde.

Für die Herstellung von Chemikalien und Treibstoffen aus Kohlendioxid muss das Gas mit Wasserstoff synthetisiert werden. Auf diese Weise lassen sich Methanol und andere Kohlenwasserstoffe gewinnen, die anschließend als Grundstoffe in der chemischen Industrie und als synthetische Treibstoffe eingesetzt werden können. Ein entsprechendes Pilotprojekt wird zum Beispiel in einer Raffinerie in Schleswig-Holstein geplant. Setzt die chemische Industrie ihre bereits angekündigten CCU-Projekte um, könnte der Sektor im Jahr 2030 weltweit schätzungsweise fünf Millionen Tonnen abgeschiedenes Kohlendioxid für die Treibstoffherstellung ver-

wenden. Knapp die Hälfte der angekündigten Projekte befindet sich zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch in einer frühen Entwicklungsphase, und vielerorts fehlen die Pipelines und andere Infrastrukturen zum Transport von Wasserstoff und Kohlendioxid.

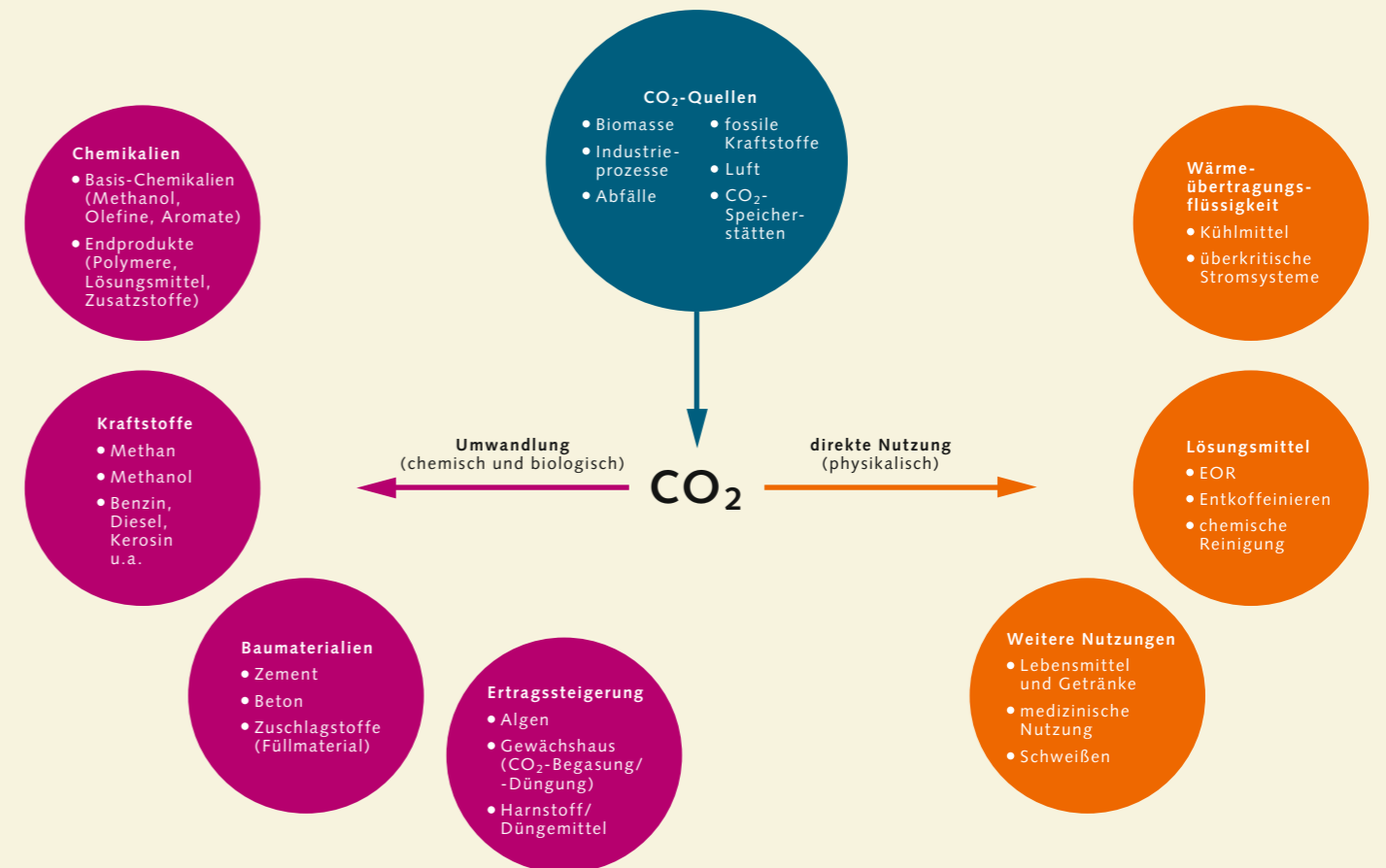
Emissionsbilanz: Die Details entscheiden

Die Emissionsbilanzen der verschiedenen Verfahren zur Kohlendioxid-Weiterverarbeitung sind nur schwer zu durchschauen. Klimaneutral sind die entstehenden Produkte nur dann, wenn das verwendete Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, grüner Wasserstoff verwendet wurde und alle Herstellungsprozesse mit Energie aus erneuerbaren Quellen gespeist wurden. Doch selbst unter diesen Voraussetzungen kann die Kohlendioxid-Weiterverarbeitung nur in wenigen Ausnahmefällen als dauerhafte Entnahmemethode bezeichnet werden – so zum Beispiel, wenn die hergestellten Produkte über einen klimarelevanten Zeitraum (länger als 100 Jahre) genutzt oder wiederverwertet werden und den enthaltenen Kohlenstoff auch so lange speichern. Beides ist jedoch nur sehr selten der Fall.

In der Regel werden CCU-Produkte nur wenige Wochen oder Monate alt und setzen den enthaltenen Kohlenstoff während ihrer Nutzung oder aber bei ihrer Entsorgung wieder in Form von Kohlendioxid frei – beispielsweise, wenn der synthetische Kraftstoff in Schiffsmotoren oder in Flugzeugturbinen verbrannt wird. Die Klimabilanz der Kraftstoffe ist nur dann ausgeglichen, wenn für ihre Herstellung ebenso viel Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen wird, wie durch die Herstellung und Verbrennung an Emissionen entsteht.

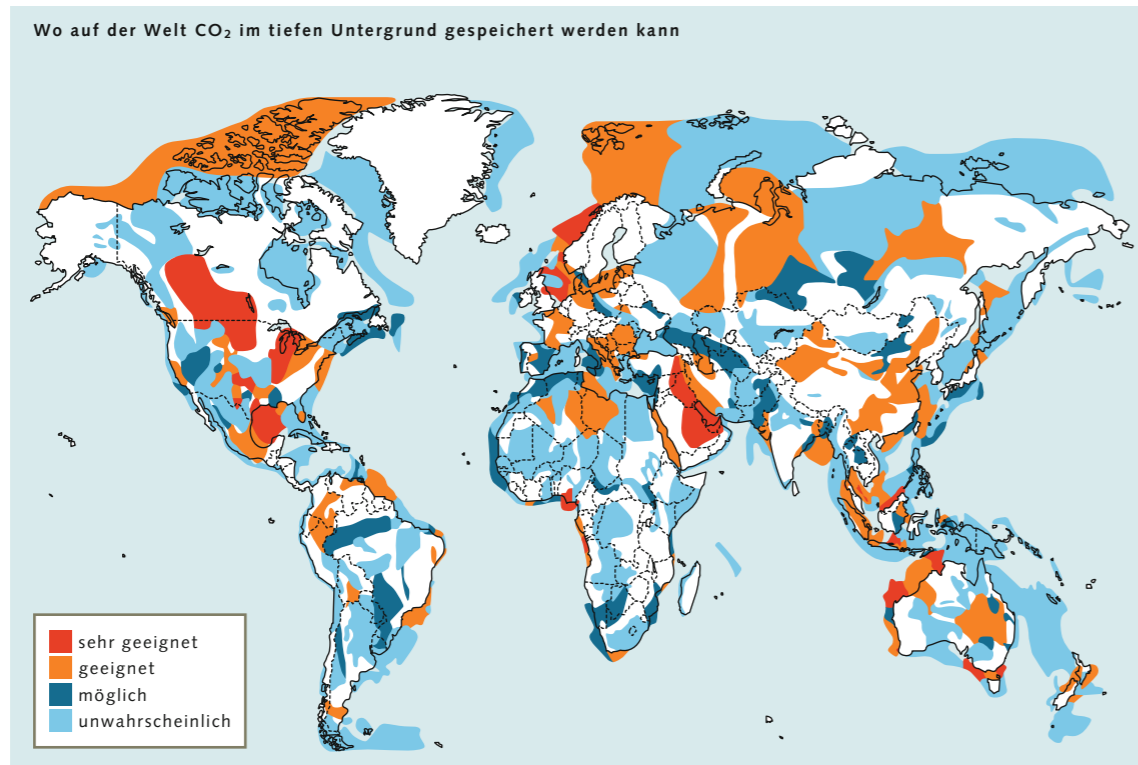
Stammt das in CCU-Produkten verwendete Kohlendioxid aus Erdöl, Erdgas oder Kohle, entstehen auf lange Sicht sogar neue Emissionen. Das bedeutet: Nur einige wenige der bislang bekannten und angewandten CCU-Technologien führen am Ende tatsächlich zu einer Entnahme von Kohlendioxid. Die IEA geht in ihrem Entwicklungsszenario für ein Erreichen der Kohlendioxidneutralität im Jahr 2050 davon aus, dass im Jahr 2030 nur etwa fünf Prozent des abgeschiedenen Kohlendioxids tatsächlich weiterverarbeitet werden. Der überwiegende Teil des Treibhausgases müsste demnach im Untergrund gespeichert werden.

Nutzungsmöglichkeiten von CO₂ mit Ausnahme der Förderung von fossilen Energieträgern
(Darstellung nach IEA 2019)



8.11 > Abgeschiedenes Kohlendioxid und vor allem der darin enthaltene Kohlenstoff lassen sich für eine Vielzahl von Anwendungen nutzen. Um eine klimawirksame Wirkung zu erzielen, müssen das Gas oder der Kohlenstoff aber so weiterverarbeitet werden, dass sie nicht mehr in die Atmosphäre entweichen können.

8.12 > Für die unterirdische Speicherung von Kohlendioxid eignen sich vor allem großporige Gesteinsformationen, die von einer undurchlässigen Barrierschicht bedeckt sind. Dies ist nur in einigen Regionen der Welt der Fall.



Energieministerium in die Entwicklung neuer Speichertechnik investieren. Kanada hat Steuererleichterungen für CCS-Projekte eingeführt, Dänemark CCS-Subventionen in Höhe von fünf Millionen Euro zugesagt und Norwegen Investitionen in Höhe von umgerechnet 100 Millionen US-Dollar. Das Geld soll in den Bau dreier großer Wasserstoffproduktionsstätten fließen. Die Europäische Union fördert bereits vier CCS-Projekte mit Mitteln aus ihrem Fond für Energie und Innovation – darunter ein BECCS-Projekt in Stockholm, Schweden, eine Zementfabrik in Frankreich, eine Anlage zur Gewinnung von Wasserstoff in Finnland sowie eine Fabrik zur Herstellung von Wasserstoff, Ammonium und Ethylen in Belgien. Weitere sieben CCS-Projekte haben es in die zweite Ausschreibungsrunde dieses Förderwettbewerbs geschafft.

Großbritannien will neuen Regierungsplänen zufolge ab dem Jahr 2030 etwa 20 bis 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid in seinen Industriesektoren abscheiden und einen Großteil des anfallenden Kohlendioxids in mindestens zwei Speicherprojekten („East Coast“ und „HyNet“) unterirdisch verpressen. In Japan, China, Malay-

sia, Indonesien und Australien unterstützen die Regierungen ebenfalls die Suche und den Ausbau geologischer Kohlendioxidsspeicher und der dazugehörigen Infrastrukturen. In Australien betreiben die beiden Erdölkonzerne Chevron Australia und Exxon bereits seit dem Jahr 2019 das „Gorgon“-CCS-Projekt. Dabei wird aus dem Meer gefördertes Erdgas über eine Pipeline an Land geleitet, das enthaltene Kohlendioxid abgetrennt und anschließend unter Barrow Island verpresst – einer Insel vor der Nordwestküste Westaustraliens.

Die ölfördernden Staaten in Nordafrika sowie im Mittleren Osten verfolgen ebenfalls CCS-Expansionspläne. Drei Anlagen für Kohlendioxidabscheidung sind bereits in der Region in Betrieb – jeweils eine in den Vereinigten Arabischen Emiraten, in Saudi-Arabien sowie in Katar. Neue Speicherprojekte werden ebenfalls bereits geplant. Die Zukunftsperspektiven für CCS seien nie besser gewesen als jetzt, schreibt das Global CCS Institute in seinem Jahresbericht für 2022. Insgesamt aber zieht die Denkfabrik ein ernüchterndes Fazit: Die globalen Anstrengungen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren – ein-

schließlich der Investitionen in CCS –, seien nach wie vor völlig unzureichend.

Umwelt- und Klimaschützer kritisieren die staatliche Unterstützung für CCS scharf – insbesondere für Projekte, die von erdöl- und erdgasfördernden Unternehmen vorangetrieben werden und darauf abzielen, Kohlendioxid aus der Verbrennung oder Verarbeitung fossiler Rohstoffe abzuscheiden und zu speichern. Entsprechende Projekte dienen dem „Greenwashing“ und würden den Ausstieg aus fossilen Rohstoffen unnötig hinauszögern, argumentieren Kritiker. Würde man alle grüne Energie, die für eine klimaneutrale Abscheidung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen benötigt würde, in das Stromnetz einspeisen, könnte man die Verstromung von Kohle, Erdöl und Erdgas vermutlich einstellen, so die CCS-Gegner. Andere Experten verweisen darauf, dass CCS unverzichtbar sei, wenn Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie BECCS und DACCS im industriellen Maßstab zum Einsatz kommen sollen. Daher müssten die Speichersuche, der

Infrastrukturaufbau und die technologische Entwicklung vorangetrieben werden.

In der Bundesrepublik Deutschland müssten nach Angaben der Deutschen Energie-Agentur (dena) pro Jahr etwa rund 34 bis 73 Millionen Tonnen Kohlendioxid aufgefangen und in tiefen Gesteinsschichten gespeichert werden, wenn das Land sein Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 erreichen will. Da eine technische Speicherung von Kohlendioxid an Land vielerorts politisch kaum durchsetzbar ist, ziehen Fachleute immer häufiger eine Speicherung im geologischen Untergrund der Meere in Betracht.

Machbar wäre dies mithilfe zweier Verfahren. Beim ersten würde komprimiertes oder verflüssigtes Kohlendioxid in tief liegende Sandsteinformationen verpresst werden – ein Ansatz, der in allen Meeresregionen möglich ist, in denen diese sehr weit verbreiteten Formationen vorkommen. Im zweiten Verfahren würde verflüssigtes oder aber in Meerwasser gelöstes Kohlendioxid in die reakt-



8.13 > In dieser Flüssiggasanlage auf Barrow Island, Australien, wird Kohlendioxid bei der Erdgasaufbereitung abgeschieden und in einiger Entfernung in zwei Kilometer Tiefe unterirdisch verpresst.



8.14 > Im „Sleipner“-Projekt des norwegischen Erdölkonzerns Equinor werden seit dem Jahr 1996 etwa 0,9 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr bei der Erdgasaufbereitung abgeschieden und anschließend tief unter der Nordsee eingelagert.

Mechanismen für eine Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund

Struktureller Einschluss

Eine undurchlässige Deckschicht verhindert, dass das Kohlendioxid aus dem Speichergestein nach oben entweicht.

Kapillarer/residualer Einschluss

Ein großer Teil des CO₂ wird im Porenraum zwischen den Sandkörnern eingeschlossen.

CO₂-Lösung

Mit der Zeit löst sich das injizierte CO₂ im salzigen Porenwasser des Speichergesteins. Das CO₂-reiche Wasser wird schwerer und sinkt nach unten.

Mineralisierung

Das im Wasser gelöste Kohlendioxid reagiert mit im Speichergestein enthaltenen Mineralen, wird in gelöstes Bikarbonat umgewandelt und fällt am Ende in Form von Karbonatmineralen aus. In diesen ist das einstige Kohlendioxid fest gebunden.

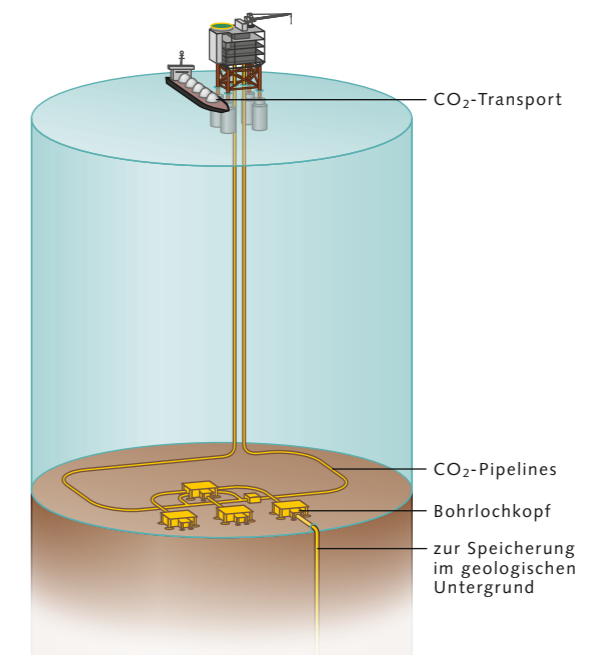
Das eingelagerte CO₂ muss während und nach der Injektion mit verschiedenen Technologien überwacht werden.

tionsfreudige, poröse obere Basaltschicht der Ozeankruste oder in sogenannte Flutbasalte eingeleitet. Erstere finden sich vor allem an den Mittelozeanischen Rücken. Letztere können auch in Küstennähe vorkommen.

Die Speicherung von Kohlendioxid in Sandsteinformationen

Sandsteinformationen, die als geologischer Kohlendioxid-speicher infrage kämen, existieren sowohl an Land als auch im tiefen Untergrund unter den Meeren (800 Meter und tiefer). Im Vergleich zu manch anderen Gesteinen sind diese Sedimentgesteinsschichten durchlässiger und weisen Poren zwischen den einzelnen Sandkörnern auf, in denen sich das eingeleitete Kohlendioxid ausbreiten kann. Voraussetzung für eine dauerhafte Speicherung ist auch hier, dass die Speichergesteine von einer geeigneten Barrierschicht, zum Beispiel aus Tonstein oder Salzgestein, überlagert werden. Eine solche Schicht dichtet nämlich das Speichergestein ab und verhindert ein Aufsteigen und mögliches Entweichen des eingeleiteten Kohlendioxids.

Erfüllt ein Speicherstandort diese und weitere geologische Voraussetzungen, kann das abgeschiedene Kohlen-

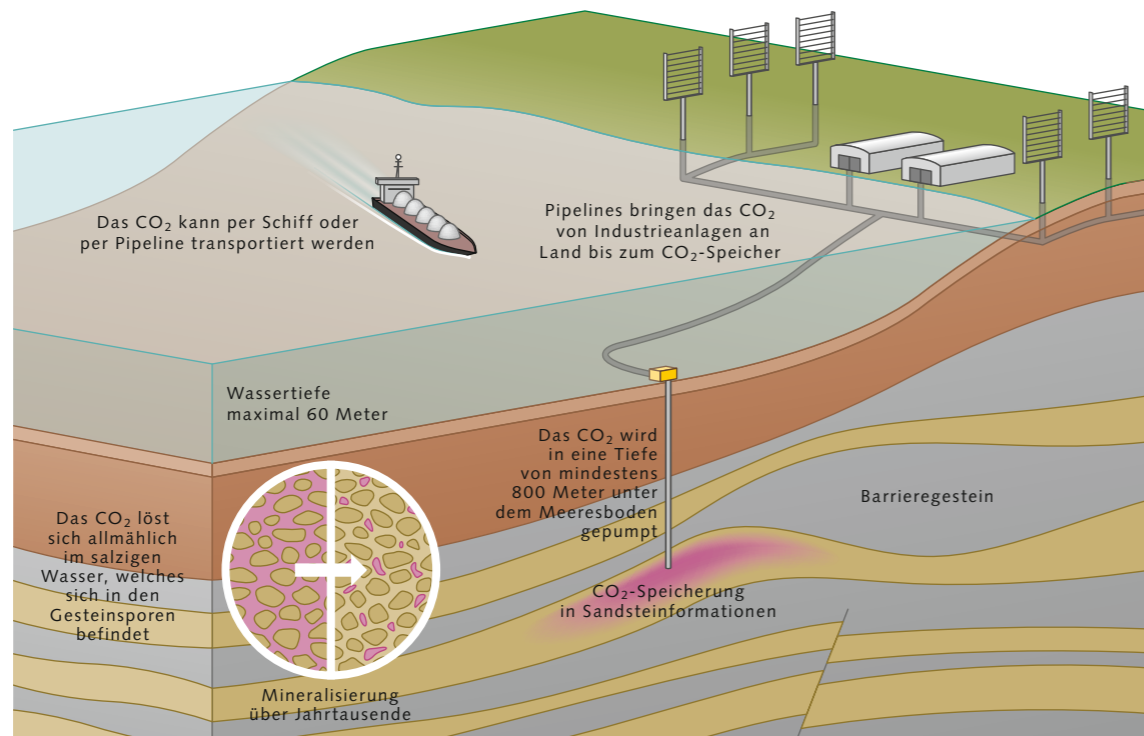


8.15 > Vier Mechanismen tragen dazu bei, dass Kohlendioxid in tief liegenden Gesteinsformationen gespeichert werden kann. Wirklich sicher ist das Gas allerdings erst dann eingelagert, wenn es sich im Porenwasser gelöst hat und anschließend mineralisiert ist.

dioxid komprimiert, gegebenenfalls verflüssigt und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformationen injiziert werden. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den mit salzigem Wasser gefüllten Gesteinsporen aus. Fachleute nennen dieses salzige Porenwasser auch Formationswasser. Da das injizierte Kohlendioxid leichter ist als das Formationswasser, steigt es im Speichergestein auf. Es sammelt sich am höchsten Punkt unter der Barrierschicht und verbleibt dort – vorausgesetzt, die Barrierschicht ist wirklich undurchlässig.

Im Laufe der Zeit löst sich das Kohlendioxid dann im Formationswasser auf. Die dabei entstehende Lösung ist schwerer als Wasser, sodass das Kohlendioxid nicht mehr zur Oberfläche aufsteigt. Anschließend reagiert das im Wasser gelöste Kohlendioxid mit im Sandstein enthaltenen Mineralen und wird dabei in gelöstes Bikarbonat umgewandelt. In dieser Form hat der eingebrachte Kohlenstoff keine schädliche Klimawirkung mehr, selbst dann nicht, wenn das gelöste Bikarbonat in das Meer entweichen sollte. Wie schnell die Umwandlung von Kohlendioxid in Bikarbonat abläuft, hängt davon ab, wie viele reaktive Minerale im Speichergestein vorhanden sind. Das Bikarbonat fällt schließlich aus und bildet Feststoffe, in denen der eingebrachte Kohlenstoff dauerhaft gebun-

8.16 > Das abgeschiedene und komprimierte Kohlendioxid kann entweder über eine Pipeline zur Injektionsstelle transportiert werden oder per Schiff.



den wird. Es können jedoch viele Jahrtausende vergehen, bis diese Prozesse abgeschlossen sind.

Kohlendioxid-Speicherprojekte in der Nordsee

Die Nordsee weist viele Gebiete auf, die sich für die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund eignen könnten. Berechnungen zufolge könnten etwa 150 bis 190 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in ihren unterirdischen Sandsteinformationen eingelagert werden – die Norwegische See und die Barentssee mit eingeschlossen. Als Schelfmeer ist die Nordsee zudem nicht besonders tief. Ihre maximale Wassertiefe beträgt in deutschen Gewässern gerade einmal 60 Meter, was den Aufbau oder die Installation von Injektionsanlagen auf Plattformen und am Meeresboden vergleichsweise einfach macht.

Einige Nordsee-Anrainerstaaten injizieren Kohlendioxid bereits heute tief in den Meeresuntergrund oder stehen kurz davor, mit der Einleitung zu beginnen. Den Auftakt machte der norwegische Erdölkonzern Equinor (ehemals Statoil) im Jahr 1996: Nachdem die Regierung

Norwegens im Jahr 1991 eine landesweite Kohlendioxidsteuer eingeführt hatte, begann der Konzern damit, das im Erdgas enthaltene Kohlendioxid nicht mehr in die Atmosphäre freizusetzen, sondern es vor Ort auf seinen Offshore-Produktionsplattformen abzutrennen und es in Sandsteinformationen tief unter den Plattformen zu injizieren. Im sogenannten „Sleipner“-Projekt werden so seit dem Jahr 1996 etwa 0,9 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr im Untergrund verpresst.

Im „Snøhvit“-Projekt in der Barentssee wiederum deponiert der Konzern jährlich etwa 0,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid tief unter dem Meer – und das seit dem Jahr 2009. Das bedeutet, die Einlagerung und Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der Nordsee ist seit Jahrzehnten technisch machbar. Zudem verfügen Fachleute über einen hohen Erfahrungs- und Kenntnisstand zur technischen Durchführung solcher Speicherprojekte in tief liegenden Sandsteinformationen.

Andere Firmen und Länder folgen nun dem Beispiel Equinors, denn aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate wird die Speicherung des Treibhausgases im tiefen Meeresuntergrund allmählich

zum lohnenden Geschäft. Eine Tonne Kohlendioxid abzuscheiden, über eine Pipeline in das Meeresgebiet hinauszuleiten und dort im Untergrund zu verpressen, kostet je nach Standort schätzungsweise rund 80 bis 200 Euro. Zertifikate zur Emission der gleichen Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre kosteten im Jahr 2022 etwa 80 Euro. Derzeit werden mehrere neue Projekte zur Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund der Nordsee geplant und umgesetzt – so zum Beispiel vor der Küste Rotterdams (Niederlande), unter der dänischen und britischen Nordsee sowie unter norwegischen Gewässern. In allen Fällen werden dabei Sandsteinformationen erkundet, die entweder mit Salzwasser gesättigt sind (zum Beispiel „Sleipner“ und „Snøhvit“) oder aus denen zuvor Erdgas und Erdöl gefördert wurden.

Da sich industrielle Emissionsquellen wie Zementwerke oder Müllverbrennungsanlagen meist nicht am selben Ort befinden wie mögliche Nutzer des abgeschiedenen Kohlendioxids oder aber Speicherstätten, muss Kohlendioxid transportiert werden. Im „Sleipner“-Projekt in der norwegischen Nordsee wird das Kohlendioxid direkt vor Ort an der Erdgasförderstelle auf dem Meer abgeschieden und verpresst, während im „Snøhvit“-Projekt in der Barentssee das Kohlendioxid von einer Aufbereitungsanlage an Land über Pipelines am Meeresboden zu den Injektionsbohrungen transportiert wird. Ein Transport mit Pipelines oder Schiffen ist auch für die Speicherung von Kohlendioxid im norwegischen „Northern Lights“-Projekt in der Nordsee sowie für weitere Projekte vor der Küste der Niederlande, Dänemark und Großbritanniens vorgesehen.

CCS wird heutzutage im Verbund geplant und umgesetzt

Wurden in der Vergangenheit vor allem CCS-Projekte mit einer einzelnen Anlage für die Abscheidung von Kohlendioxid und einem eigenen nachgeschalteten Transport- und Speichersystem geplant und umgesetzt, bilden sich seit einigen Jahren verstärkt regionale Verbünde von Unternehmen, die eine gemeinsame Transport- und Speicherinfrastruktur (zum Beispiel Pipelines, Hafenanlagen, Zwischenspeicher, Speicherstandorte) entwickeln und

nutzen wollen. Ein prominentes Beispiel ist das CCS-Projekt des Hafens von Rotterdam, an dem viele der dort ansässigen Unternehmen beteiligt sind. Ein ähnlicher Zusammenschluss hat sich auch in Houston, Texas, gebildet. Dort treiben aktuell 14 Unternehmen den Aufbau einer großen CCS-Infrastruktur voran, darunter vor allem erdölfördernde Konzerne und der Chemieriese Dow. Sie wollen Kohlendioxid in ihren Raffinerien und Fabriken im Hafen von Houston abscheiden, über Pipelines in den Golf von Mexiko leiten und dort tief im Meeresuntergrund verpressen.

Andere Konzerne planen grenzüberschreitende Kohlendioxid-Transportnetzwerke an Land und im Meer, um das Treibhausgas von den Abscheidungsanlagen an Punktquellen zum finalen Speicherplatz zu transportieren. Der Erdölkonzern Santos beispielsweise will künftig abgeschiedenes Kohlendioxid von der nordaustralischen Stadt Darwin zur Verpressung in das Seegebiet des benachbarten Inselstaates, der Demokratischen Republik Timor-Leste, leiten und dafür eine ausgediente Erdgaspipeline nutzen.

8.17 > Vor dem Hafen von Rotterdam soll ab dem Jahr 2026 abgeschiedenes Kohlendioxid in einem leergeförderten Gasfeld unter der Nordsee verpresst werden. Allerdings geht es auch hierbei vor allem darum, Kohlendioxid aus fossilen Quellen einzulagern – das heißt, zusätzliche Emissionen zu verhindern. Es findet keine echte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre statt.



In Europa wollen die Unternehmen Wintershall Dea und Equinor eine Kohlendioxid-Pipeline bauen, die von Wilhelmshaven an der deutschen Nordseeküste bis in die norwegische Nordsee führt. Parallel dazu untersuchen Fachleute in weiteren Projekten, ob es zielführend sei, Tankschiffe mit einem Ladevolumen von 30 000 bis 70 000 Kubikmeter einzusetzen, die abgeschiedenes Kohlendioxid auch aus weiter entfernten Quellen kostengünstig zu speichern vor der Küste Norwegens und anderer Schelfmeer-Anrainer befördern könnten.

Die Risiken einer Speicherung von Kohlendioxid in Sandsteinformationen unter dem Meer

Aufgrund der Erfahrungen aus laufenden Kohlendioxid-Speicherprojekten und von Forschung in den vergangenen zwei Jahrzehnten kennen Fachleute die Risiken, welche das Verpressen von Kohlendioxid in Sandsteinformationen unter dem Meer mit sich bringt, recht gut. Dazu gehören die vier Gefahrschwerpunkte, wonach:

- ein Teil des in den Untergrund injizierten Kohlendioxids durch sogenannte Störungen oder entlang von Bohrlöchern aufsteigt und am Meeresboden austritt (Leckagen);
- sehr salziges Formationswasser sowie möglicherweise darin enthaltene Schwermetalle und andere für die Umwelt schädliche Stoffe am Meeresboden austreten und die lokalen Ökosysteme beeinträchtigen;
- Druckveränderungen im Speichergestein vorhandene geologische Störungen reaktivieren und Erdbeben auslösen, welche die Standfestigkeit und die Funktionalität von am Meeresboden verankerten Infrastrukturen gefährden könnten;
- Meeressäugetiere gestört oder möglicherweise geschädigt werden durch Lärm, der bei der Suche nach geeigneten Speicherformationen, beim Bau der Anlagen sowie bei der Überwachung des Speichers entstehen kann.

Welche dieser Risiken tatsächlich auftreten und in welchem Ausmaß, hängt von den lokalen Gegebenheiten ab und muss im Vorfeld eines jeden Kohlendioxid-Speicherprojektes gründlich untersucht werden.

Wenn Kohlendioxid oder Formationswasser aus dem Meeresboden entweicht

Der Meeresboden von Schelfmeeren ist in der Regel keine dicht versiegelte Fläche. Im Gegenteil: An einigen Stellen tritt Erdgas aus dem Meeresboden aus. In der Nordsee etwa werden pro Jahr und Austrittsstelle etwa ein bis maximal 70 Tonnen Erdgas freigesetzt. Die Herkunft dieses Gases ist nicht immer eindeutig. Es wird entweder von Mikroorganismen im Meeresboden gebildet oder kann entlang natürlicher Störungen aus Lagerstätten von Erdgas im tiefen Untergrund aufsteigen. Zudem entweicht in der Nordsee Erdgas an alten Bohrlöchern in einer Größenordnung von ein bis 19 Tonnen pro Austrittsstelle und Jahr.

Kohlendioxidleckagen an modernen, speziell für den Zweck der Kohlendioxidspeicherung erstellten Bohrungen sind bislang nicht bekannt. Bei den norwegischen Speicherprojekten, die bereits seit vielen Jahren betrieben werden, wurde bisher ebenfalls kein Kohlendioxid am Meeresboden freigesetzt. Dennoch muss bei der Auswahl von Speicherstandorten auf die Existenz von Störungen und anderen speziellen Sedimentstrukturen im Untergrund geachtet werden, durch die Kohlendioxid und unter Umständen auch Formationswasser zum Meeresboden aufsteigen könnten. Gleichzeitig muss überprüft werden, ob Altbohrungen vorhanden sind – und wenn ja, ob diese dicht verschlossen sind.

Im Vorfeld eines Kohlendioxid-Speicherprojektes unter dem Meer gilt es zudem, das Formationswasser in den ausgewählten Speicherformationen chemisch zu analysieren. Auf Basis der Ergebnisse kann beurteilt werden, welche Umweltrisiken auftreten könnten, sollten das Formationswasser und möglicherweise darin enthaltene Schwermetalle oder andere umweltschädliche Stoffe aus dem Meeresboden entweichen.

Freisetzungsexperimente am Meeresboden der Nordsee zeigen, dass sich austretendes Kohlendioxid sofort im bodennahen Meerwasser löst und dabei dessen chemische Eigenschaften verändert. Das Meerwasser rund um die Austrittsstelle versauert, wodurch die Lebensbedingungen insbesondere für Muscheln und andere kalkbildende Tiere beeinträchtigt werden. Das von der Versauerung betroffene Gebiet ist dabei vergleichsweise klein (circa zehn bis 50 Quadratmeter), wenn in etwa die

gleiche Menge Kohlendioxid entweicht wie Erdgas an den oben beschriebenen Austrittsstellen der Nordsee.

Für sorgfältig erkundete und ausgewählte Kohlendioxid-Speicherstandorte im Meeresgebiet gehen Fachleute davon aus, dass bei einem planmäßigen Betrieb nur ein sehr geringer Anteil Kohlendioxid aus dem Speicher entweichen kann, sodass mehr als 99 Prozent des eingelagerten Kohlendioxids auf Dauer im Untergrund verbleiben.

Dennoch müssen Leckagen weitgehend vermieden werden. Geeignete Frühwarn- und Überwachungssysteme sind nötig, um Abweichungen vom erwarteten Speicherverhalten frühzeitig zu erkennen und schnell geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen. Bei der Erforschung, Erprobung und kommerziellen Anwendung von Überwachungstechnologien sind in den zurückliegenden Jahren Fortschritte gemacht worden. So wurden insbesondere Überwachungstechnologien für den Offshore-Bereich getestet und weiterentwickelt. Dabei führten die beteiligten Fachleute auch Experimente durch, in denen sie Kohlendioxid gezielt am oder im Meeresboden freisetzen, um zu testen, wie effektiv eine Technologie oder ein Verfahren das austretende Kohlendioxid detektieren kann. Bei einem solchen Experiment in der britischen Nordsee konnten die eingesetzten Sensoren das freigesetzte Kohlendioxid sogar bei einer sehr geringen Freisetzungsrate von sechs Kilogramm pro Tag im Sediment und in der Wassersäule nachweisen.

Insgesamt, so das Expertenurteil, steht eine große Bandbreite von Überwachungstechnologien zur Verfügung, die für die Kohlendioxidspeicherung im großen Maßstab genutzt werden kann. Technische Verbesserungen sind trotzdem möglich und wünschenswert – so zum Beispiel in den Bereichen Sensortechnik, Datenmanagement und intelligenten autonomen Systemen, zu denen auch autonome Unterwasserroboter zählen. Diese haben bislang eine eingeschränkte Entscheidungsautonomie und folgen bei ihren Patrouillenfahrten vordefinierten Fahrwegen. Gebraucht würden jedoch vollständig autonom agierende Unterwasserfahrzeuge, die in der Lage sind, basierend auf Sensormessungen, in Echtzeit intelligent zu handeln. An der Entwicklung entsprechender Technologien wird bereits gearbeitet. Sollten sie in naher Zukunft einsetzbar sein, würden auch die Kosten der Speicherüberwachung sinken.

Große Hoffnungen setzen Ingenieure zudem auf glasfaserbasierte Überwachungssysteme. Gemeint sind Glasfaserkabel, die mit vielen Sensoren gespickt sind. Die Kabel können an der Erdoberfläche verlegt werden, im Boden entlang von Rohrleitungen, auf dem Meeresboden sowie direkt in Tiefbohrungen, sodass sowohl die Injektion als auch die Speicherung des Kohlendioxids engmaschig überwacht werden können. Abhängig von den ausgewählten Sensoren lassen sich nämlich verschiedene Parameter engmaschig und in hoher zeitlicher Abfolge erfassen. So können freies und in Wasser gelöstes Kohlendioxid direkt bestimmt werden. Die Glasfaserkabel werden außerdem genutzt, um den Druck, die Temperatur, die Gassättigung des Porenraums sowie die Seismizität und Deformationen des Untergrundes zu ermitteln. Setzt man die Glasfaser als Geofon ein, lassen sich auch seismische Messungen durchführen. Alles, was derzeit noch fehlt, sind aussagekräftige langjährige Einsatzerfahrungen mit solchen Überwachungskabeln, insbesondere was die Langzeitstabilität der Fasern und Sensoren in anspruchsvoller Umgebung angeht. Daher wird der Einsatz solcher Verfahren unter anderem in einem europäischen Verbundforschungsprojekt getestet und weiterentwickelt. Experten zufolge kann ihr Einsatz in Kombination mit herkömmlichen Überwachungsverfahren heute schon sinnvoll sein. Langfristig könnten die Kabel herkömmliche Überwachungstechnologien sogar vollständig ersetzen. Die Kosten für den Aufbau und Einsatz solcher Glasfaserkabel sind bislang nämlich konkurrenzlos günstig.

Wenn die Kohlendioxid-Injektion Bewegungen im Untergrund auslöst

Wenn Kohlendioxid in ein Speichergestein injiziert wird, steigt der Druck in der Gesteinsformation. Dadurch können unter Umständen vorhandene Störungen innerhalb der Gesteinsformation aktiviert werden. Das heißt, an bestimmten Stellen könnten sich Risse im Gestein weiten oder Gesteinsschichten gegeneinander verschieben. Durch diese Bewegungen im Untergrund können Pfade entstehen, durch die das eingelagerte Kohlendioxid und das Formationswasser aufsteigen und später aus dem Meeresboden austreten können.

In Meeresgebieten, in denen schon auf natürliche Weise Erdbeben auftreten, könnte es infolge der Druck-

8.18 > Für die Erkundung und Überwachung von Kohlendioxidsspeichern unter dem Meer müssen sogenannte Luftpulser eingesetzt werden. Ihr Lärm stellt für Schweinswale und viele andere Meeresbewohner vermutlich eine hohe Gefahr und Belastung dar.



Veränderungen im Speichergestein zu Spannungsänderungen im Untergrund kommen. Dadurch könnten Erdbeben ausgelöst werden, welche die Standfestigkeit von Windkraftanlagen oder Pipelines gefährden würden. Ein Kohlendioxid-Pilotspeicher im japanischen Nagaoka in der Präfektur Niigata überstand ein schweres Erdbeben der Intensität 7 unbeschadet. Rückschlüsse auf andere Speicherstandorte sind jedoch nur bedingt möglich, weil dafür standortspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

Ob an Land oder im Meer: Potenzielle Standorte für die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund müssen umfassend erkundet werden. Es gilt, ihre geologische Beschaffenheit, mögliche Leckagepfade und die lokal herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse zu untersuchen, bevor über ihre Eignung als Speicher von Kohlendioxid entschieden werden kann.

Lärmbelästigungen für Wale, Fische & Co.

Bei der Suche und Erkundung möglicher Kohlendioxid-Speicherstandorte im Meeresuntergrund werden diesel-

ben geophysikalischen Methoden angewandt wie für die Suche nach Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Gemeint sind unter anderem aktive seismische Verfahren, bei denen zum Beispiel sogenannte Luftpulser vom Schiff aus zu Wasser gelassen werden. Diese erzeugen bei jedem Puls Schallwellen, die tief in den Untergrund eindringen und von den Gesteinsschichten auf unterschiedliche Weise reflektiert werden. Anhand der Ausbreitung und Reflexion der Schallwellen können Fachleute die Gestalt und den Aufbau des Untergrundes abbilden.

Der Nachteil der Luftpulser: Ihre Schallwellen verursachen Unterwasserlärm, über dessen Auswirkungen auf das Leben im Meer und insbesondere auf lärmempfindliche Nordseebewohner wie Schweinswale bisher nur wenig bekannt ist. Da Schweinswale sowohl zur Orientierung als auch zur Kommunikation und zur Nahrungssuche auf akustische Signale angewiesen sind, beeinflusst Unterwasserlärm ihr Verhalten und kann sie langfristig aus ihrem ursprünglichen Lebensraum vertreiben. Sehr hohe Schallpegel bestimmter Frequenzen können die Tiere zudem verletzen und mitunter dauerhaft schädigen.

Das Gleiche gilt in anderen Schelfmeeren für die dort heimischen Meeressäuger und andere Tiere.

Auf Grundlage dieses Wissens und in Anbetracht des ohnehin stetig steigenden Lärmaufkommens in den Küstenmeeren ist es unabdingbar, die Risiken lärmintensiver Arbeiten für Meeresorganismen zu kennen und entsprechende Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Berücksichtigt werden müssen die Risiken einer Lärmsteigerung durch die Speichersuche, -befüllung und -überwachung, aber auch bei der marinen Raumplanung – etwa, wenn es um die Frage geht, ob geeignete Gesteinsschichten unter Meeresschutzgebieten für eine Kohlendioxidsspeicherung freigegeben werden sollten oder nicht.

Als lärmarme Überwachungsmethode bieten sich zum Beispiel passive seismische Verfahren an. Für sie werden hoche sensible Messgeräte auf dem Meeresboden platziert, die dann völlig geräuschlos sowohl natürlich auftretende seismische Ereignisse aufzeichnen würden als auch solche, die durch eine Kohlendioxid-Injektion entstünden. Bedacht werden muss allerdings: Wo passiv-seismische Messgeräte am Meeresboden liegen, müssen diese vor Zerstörungen geschützt werden. Das heißt, der Fischfang und das Anker von Schiffen und Booten müssten eventuell eingeschränkt werden.

Wachsende Nutzungsansprüche an die Nordsee

Schifffahrt, Windparks, Fischerei, Pipelines, Erdgasförderung: Die deutsche Nordsee und viele andere Meeresgebiete werden bereits heute intensiv vom Menschen genutzt. Gleichzeitig sind die meisten von ihnen aber auch ein wichtiger Lebensraum für viele verschiedene Meereslebewesen, die durch das Ausweisen von Meeresschutzgebieten geschützt und erhalten werden sollen. Um Konflikte mit dem Meeresschutz und anderen Nutzungen zu vermeiden, müssten potenzielle Kohlendioxid-Speicherstandorte in die maritime Raumordnung integriert werden.

Bislang aber berücksichtigen die Meeresraumpläne für deutsche Gewässer nur die Nutzung des Meeresbodens, der Wassersäule sowie des Luftraums darüber. Eine weitergehende Nutzung des Meeresuntergrundes in verschiedenen Tiefenlagen ist auch in den überarbeiteten, im Jahr 2021 in Kraft getretenen Festlegungen nicht erwähnt.

Im Hintergrund diskutieren Experten aber bereits darüber, wie die Kohlendioxidsspeicherung in die maritime Raumplanung Deutschlands integriert werden kann.

Kohlendioxidsspeicherung im reaktionsfreudigen Basaltgestein der oberen Ozeankruste

Neben den Sandsteinformationen der Erde bieten sich auch eisen- und magnesiumreiche Gesteinsschichten als möglicher Kohlendioxidsspeicher an. Fachleute bezeichnen diese auch als „mafische“ oder „ultra-mafische“ Gesteine – eine Bezeichnung, die sich aus den Elementsymbolen „Ma“ für Magnesium und „F“ für Ferrum (Eisen, Fe) zusammensetzt.

Reich an Eisen und Magnesium sind vor allem magmatische Gesteine: Dazu zählen vulkanische Fest- und Lockergesteine, vor allem aber Basaltgesteine. Diese sind weitverbreitet und kommen sowohl an Land vor (etwa in Indien, Australien, Kanada oder Südafrika) als auch unter dem Meeresboden. Aus Basaltgestein besteht zum Beispiel die obere ozeanische Erdkruste.

Wer beim Wort Basaltgestein an dunkles Kopfsteinpflaster denkt, hat tatsächlich Basaltgestein vor Augen. Die Gesteine der oberen 100 bis 400 Meter Ozeankruste aber haben wenig mit dem dichten, feinkörnigen Gestein zu tun, mit dem wir Menschen Marktplätze oder Hofeinfahrten pflastern. Stattdessen sind diese Gesteinsschichten hochporös und stellenweise von millimetergroßen Blasen und Rissen durchzogen.

Diese offenporige Struktur entsteht, wenn sich die sechs bis acht Kilometer dicke Ozeankruste neu bildet. Das geschieht in sogenannten Spreizungszonen wie zum Beispiel dem Mittelatlantischen Rücken. In diesen Zonen der Erde bewegen sich zwei Erdplatten langsam auseinander, weil zwischen ihnen heißes Magma aus dem Erdinnern an die Oberfläche dringt. Kommt es mit dem kalten Meerwasser in Berührung, wird es an seiner Oberfläche abgeschreckt. Dabei verändert sich die Struktur des oberflächennahen Gesteins grundlegend. Es wirft Blasen, reißt auf oder bildet Schrumpfungsrisse an vielen Stellen. Auf diese Weise entsteht ein Netzwerk aus winzigen Hohlräumen und Gängen, welches den oberen Teil des Basaltgesteins fortan flächendeckend durchzieht.

Durch dieses unterirdische Porennetzwerk zirkuliert Meerwasser. Man kann sich die oberen 400 Meter Basaltgestein wie ein riesiges Leitungssystem für Fluide (Flüssigkeiten und Gase) vorstellen. Es bildet die größte wasserführende Gesteinsformation (Aquifer) der Erde, direkt unter dem Ozean. Ihr Porenraum böte daher ausreichend Speichervolumen, um große Mengen verflüssigtes Kohlendioxid oder aber kohlendioxidreiches Wasser einzuleiten, argumentieren Fachleute.

Kohlendioxid in Basaltgestein einzulagern, bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber einer Speicherung in porösen Sandsteinformationen. Das basische Basaltgestein reagiert sehr schnell, wenn es mit kohlendioxidreichen Lösungen in Kontakt kommt. Die Erklärung dafür liegt in seiner chemischen Zusammensetzung. Das magmatische Gestein enthält Minerale wie Olivin, Plagioklas, Pyroxene oder vulkanisches Glas. Diese wiederum besitzen als Hauptbestandteile unter anderem Kalzium, Magnesium und Eisen.

Reichert man nun Meerwasser mit Kohlendioxid an oder löst sich injiziertes Kohlendioxid langsam im Porenwasser, wird dieses zu „Sprudelwasser“ und versauert. Kommt das Wasser in diesem Zustand mit dem Basaltgestein in Kontakt, greift die im Wasser enthaltene Säure die Basaltoberfläche an und löst deren Eisen-, Magnesium- und Kalzium-Bestandteile heraus. Diese reagieren anschließend mit dem gelösten Kohlendioxid und bilden Karbonate, die zunächst einmal im Wasser gelöst bleiben. Setzt sich diese Lösungsreaktion jedoch fort, übersättigt das Wasser zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Karbonate fallen aus. Das heißt, es bilden sich Karbonatminerale wie Kalzit, Dolomit oder Ankerit – oder vereinfacht gesagt: Mineralgesteine, in denen das einstige Kohlendioxid fest gebunden ist, bestenfalls für viele Millionen Jahre.

Fachleute sprechen deshalb auch von einer Mineralisierung des Kohlendioxids. Sie läuft in mafischen Gesteinen viel schneller und umfassender ab als in Sandsteinformationen, in denen das eingeleitete Kohlendioxid lange als separate Phase (verflüssigtes Kohlendioxid) oder gelöst im Formationswasser erhalten bleibt. Ein weiterer Pluspunkt des Basaltgesteins: Die natürliche Mineralisierung lässt sich durch eine gezielte Zugabe von Kohlendioxid technisch beschleunigen.

Erfolgsprojekt auf Island

Wie viel Kohlendioxid sich theoretisch in der oberen Ozeankruste speichern ließe, ist noch nicht gründlich untersucht, und alle Kapazitätsschätzungen sind mit großen Unsicherheiten verknüpft. Derzeit aber gehen Fachleute davon aus, dass die theoretische mineralische Kohlendioxid-Speicherkapazität der Mittelozeanischen Rücken unseres Planeten um ein Vielfaches größer ist als die Menge an Kohlendioxid, die bei der Verbrennung aller fossilen Rohstoffvorkommen auf der Erde freigesetzt würde. Denn potenziell geeignete Gesteinsschichten finden sich nicht nur an Mittelozeanischen Rücken, sondern auch in den sogenannten Flutbasaltprovinzen, die oft untermeerische Plateaus aus Basalten mit hoher Porosität oder Blasigkeit bilden.

Auf Island wird im Projekt „CarbFix“ seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und im Wasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert. Die Vulkaninsel liegt genau auf dem Mittelatlantischen Rücken, sodass junges, noch warmes und damit sehr reaktionsfreudiges Basaltgestein schon durch vergleichsweise kurze Bohrungen zu erreichen ist. Die Mineralisierungsraten sind dementsprechend hoch: Innerhalb von zwei Jahren mineralisieren aufgrund der hohen Reaktivität der heißen Kruste Islands circa 98 Prozent des injizierten Kohlendioxids und sind somit fest im Untergrund gebunden. Bis April 2023 hatte „CarbFix“ nach eigenen Angaben mehr als 90 000 Tonnen Kohlendioxid in die Erdkruste injiziert, wobei allerdings viel geothermische Energie und große Mengen Süßwasser verbraucht wurden.

Ein Rechenbeispiel: Um eine Tonne Kohlendioxid in dem von „CarbFix“ verwendeten Verfahren in Wasser zu lösen, werden 27 Tonnen Süßwasser, ein Druck von 25 Bar sowie eine Wassertemperatur von 25 Grad Celsius benötigt. Der Energie-Mehrbedarf für die Wasserinjektion ist nach aktuellem Forschungsstand schwer abschätzbar. Auf der Vulkaninsel Island spielt dieser Unsicherheitsfaktor keine Rolle, da dort erneuerbare geothermische Energie quasi unbegrenzt zur Verfügung steht. In anderen Regionen aber ist dies nicht der Fall. Experten mahnen daher an, für künftige Speicherprojekte, in denen diese Injektionsmethode angewandt werden soll, die Kosten und die Verfügbarkeit großer



8.19 > Island ist eine Insel, bei der die junge, reaktionsfreudige obere Ozeankruste über die Meeresoberfläche hinausragt – gut zu erkennen an dem schwarzen Basaltgestein dieser Steilküste.

8.20 > Diese Rohrleitung gehört zum isländischen Projekt „CarbFix“. Dort wird seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und in Wasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert.



Mengen Wasser und Energie bei der Planung mit zu berücksichtigen und in die Kosten-Nutzen-Abwägung einfließen zu lassen.

Große Basaltvorkommen in der Tiefsee

Da es auf der Welt jedoch nur wenige Orte gibt, an denen ozeanische Kruste über die Meeresoberfläche ragt (etwa im Fall von Island und den Azoren), richtet die Wissenschaft ihren Blick in größere Wassertiefen, wo sich global betrachtet Zehntausende Kilometer Mittelozeanische Rücken finden, in deren junger, reaktionsfreudiger Basaltkruste man Kohlendioxid einlagern könnte.

Für diese Idee spricht, dass in größeren Tiefen hohe Drücke wirken. Diese tragen entweder dazu bei, das injizierte Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen, welches in der Basaltkruste zirkuliert – selbiges würde dadurch dichter und schwerer –, oder aber, dass sich das Kohlendioxid verflüssigt. Dabei würde es sich derart verdichten, dass

es ab einem Druck von 280 Bar (ab einer Wassertiefe von etwa 2800 Metern) schwerer wäre als das Meerwasser in vergleichbarer Tiefe und nicht mehr aus dem Untergrund aufsteigen könnte. Kohlendioxidlecksagen aus dem Untergrund wären somit unwahrscheinlich, wobei ein mögliches Restrisiko von den lokalen Temperatur- und Druckbedingungen abhängt.

Um Leckagen letztendlich vollends ausschließen zu können, dürften künftig nur solche Basaltschichten als Kohlendioxidsspeicher ausgewählt werden, die unter einer mehrere Hundert Meter dicken Sedimentschicht liegen. Fernab der Küsten besteht diese Sedimentschicht überwiegend aus sehr feinem Tonmaterial, welches die Basaltschicht abdichtet.

Die mitunter große Entfernung Mittelozeanischer Rücken zur nächsten Küste brächte noch einen weiteren Vorteil: Sollten durch eine Verpressung von Kohlendioxid in der oberen Basaltschicht der Ozeankruste kleine Erdbeben ausgelöst werden, was nicht ausgeschlossen wer-

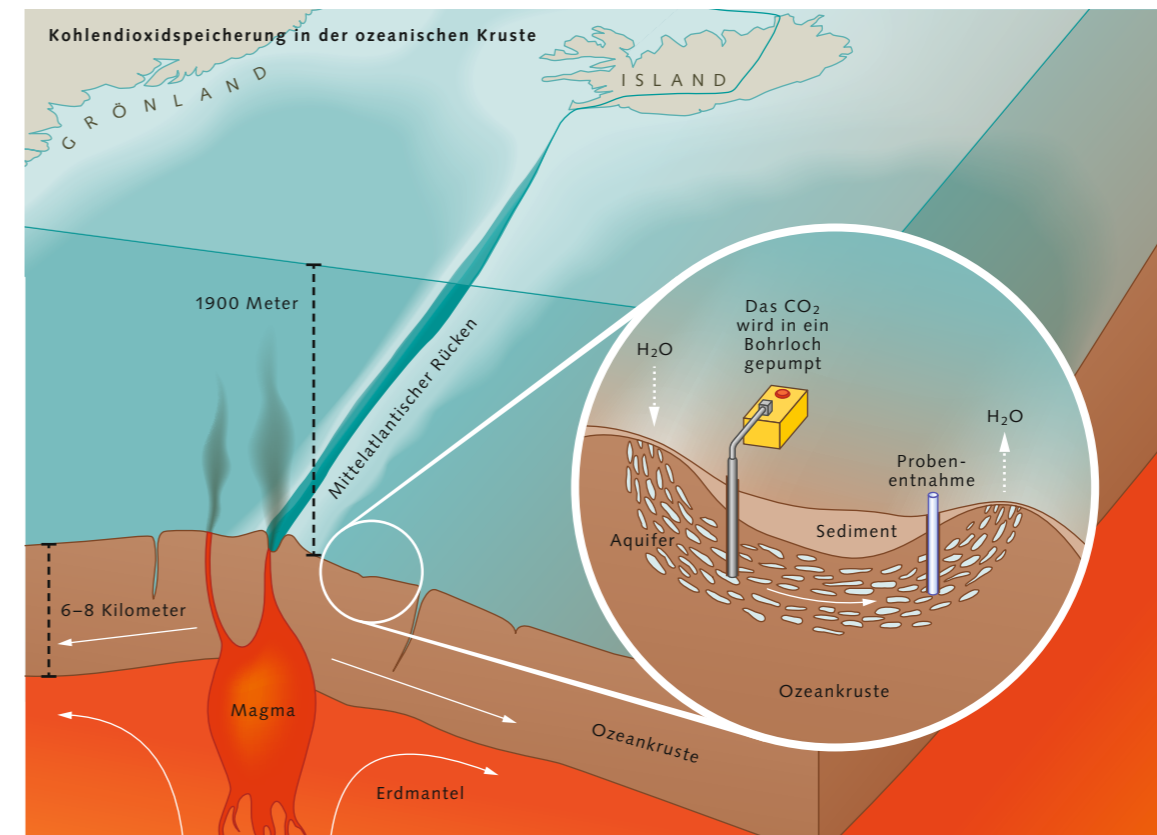
den kann, so würden diese in der Tiefe des Meeres keinen Menschen und Infrastrukturen gefährden. An Land hingegen würden sie ein Risiko darstellen.

Eine Kohlendioxideinlagerung im Tiefseeuntergrund brächte allerdings auch Nachteile: In erkalteter Basaltkruste würde injiziertes Kohlendioxid in einem deutlich geringeren Maß mineralisieren als in warmem Gestein wie auf Island. Außerdem entstünden durch die Arbeit in der Tiefsee hohe Kosten und die Fachleute liefen Gefahr, an die Grenzen der technischen Machbarkeit zu stoßen.

Aufgrund dieser komplexen Ausgangslage müssen die Ziele einer möglichen Speicherung von Kohlendioxid im oberen Teil der Ozeankruste genau abgewogen werden. Das kostengünstigste Verfahren wäre sicherlich, Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen und in geringer Wassertiefe niedrigkonzentriert mit hohen Mineralisierungsraten in die Ozeankruste zu verpressen – genau so, wie es bereits auf Island gemacht wird. Die wenigen Gebiete, in denen ein Mittelozeanischer Rücken über den Meeres-

spiegel herausragt, liegen jedoch meist fernab industrieller Zentren, in denen das meiste Kohlendioxid anfällt. Folglich müsste das Treibhausgas zunächst in verflüssigter Form über lange Strecken transportiert werden, bevor es in das Basaltgestein eingeleitet werden könnte.

Würde man hingegen das verflüssigte Kohlendioxid in größerer Wassertiefe direkt in den Porenraum der Basalte verpressen, stünden nicht nur mehr potenzielle Speicherorte zur Auswahl. Es ließen sich innerhalb kurzer Zeit auch sehr große Mengen Kohlendioxid einlagern, die aufgrund von Druck und Temperatur automatisch im Speichergestein verbleiben, dort aber nur sehr langsam mineralisieren würden. Die Mineralisierungsrate wiederum ließe sich steigern, indem man dem Kohlendioxid Meerwasser beimischt und es so verdünnt. Allerdings würde man bei diesem Ansatz deutlich mehr Zeit benötigen, um dieselbe Menge Kohlendioxid zu verpressen, da die Ozeankruste an der Rückenflanke kälter ist als beispielsweise bei „CarbFix“ auf Island.



8.21 > Ob die Kohlendioxideinlagerung in der Tiefsee ein technisch machbares und ökonomisch sinnvolles Verfahren ist, wollen Forschende mit einem Tiefseeforschungsexperiment zur Kohlendioxid-speicherung an einer erkalteten Flanke des Mittelatlantischen Rückens überprüfen.

Verstärkte Forschung, um Wissenslücken zu schließen

Das Spektrum der Möglichkeiten, Kohlendioxid in der oberen Basaltschicht der Ozeankruste zu speichern, wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht. Dabei wollen die Forschenden herausfinden:

- ob alle theoretischen Vorüberlegungen zur Kohlendioxid-speicherung in der oberen ozeanischen Kruste richtig und zielführend sind und eine Kohlendioxid-Injektion in den Tiefseeuntergrund tatsächlich umsetzbar ist;
- in welcher Konzentration und in welchen Mengen Kohlendioxid in das Basaltgestein injiziert werden sollte, um damit optimale Reaktionsprozesse zu ermöglichen;
- in welcher Geschwindigkeit das eingeleitete Kohlendioxid im Gestein verteilt und mineralisieren würde;
- mit welchen Verfahren sich die Speicherstätte in der Tiefsee verlässlich und langfristig überwachen ließe und welche Kosten entstünden;
- ob es mögliche Fallstricke gäbe, die in den konzeptionellen Überlegungen bislang keinerlei Berücksichtigung gefunden haben, und
- ob eine Kohlendioxideinlagerung in der Tiefsee im Vergleich zu Speicherungen an Land oder in den tiefen Sandsteinformationen unter den Schelfmeeren die nachhaltigere, effektivere und langfristig kostengünstigere Option wäre.

Entsprechende Forschungsvorhaben finden im „CarbFix“-Projekt auf Island statt, auf dem Vøring-Plateau vor der Küste Norwegens, im Cascadia-Becken vor der Westküste Kanadas sowie am sogenannten Reykjanes-Rücken, einige Hundert Kilometer südwestlich Islands. Die verschiedenen Projektteams arbeiten eng zusammen und teilen wissenschaftliche Daten zur Struktur, Beschaffenheit und zu den geochemischen Prozessen in den Basalten untereinander. Diese Erkenntnisse werden benötigt, um im Anschluss mithilfe von Computermodellen zu berechnen, wie viel Kohlendioxid sich an welchen Standorten in der oberen Ozeankruste einlagern ließe, welche Kosten dabei entstünden und mit welchen umwelttechnischen Pro-

blemen, Risiken und potenziellen Schäden zu rechnen wäre. Erst wenn diese vielen Fragen beantwortet sind und sich die Gesellschaft bewusst für eine Kohlendioxid-speicherung in der oberen Ozeankruste entscheiden sollte, kann die konkrete Suche nach geeigneten Standorten beginnen.

Rechtliche Rahmenbedingungen für die Kohlendioxid-speicherung unter dem Meer

Wer Kohlendioxid in der Basaltschicht der oberen Ozeankruste oder aber in tief liegenden Sandsteinformationen verpressen will, greift auf den Meeresuntergrund und somit auf ein Gebiet zu, welches von den Vorgaben des Seevölkerrechts geprägt ist. Fachleute geben außerdem zu bedenken, dass CCS-Projekte im Meer unter Umständen zu einem Entweichen von Kohlendioxid und Formationswasser aus dem Meeresboden führen und marine Ökosysteme schädigen können. Deshalb muss der rechtliche Rahmen für die Kohlendioxid-speicherung im Untergrund des Meeres insbesondere auch den Anforderungen des Meeresumweltschutzes Rechnung tragen.

Die Vorgaben des Seevölkerrechts

Am Anfang stellt sich aus seevölkerrechtlicher Sicht die Frage, ob und – gegebenenfalls – wo Staaten berechtigt sind, Kohlendioxid im Meeresuntergrund zu speichern. Antworten darauf liefert das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UN-Seerechtsübereinkommen). Es teilt die Meere in verschiedene Zonen ein, in denen die Rechte der Küstenstaaten genau definiert sind.

Dazu gehören:

- die Inneren Gewässer und das Küstenmeer eines Staates,
- die Anschlusszone,
- die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ),
- der Festlandsockel,
- die Hohe See und „das Gebiet“ (der Meeresboden in internationalen Gewässern).

Da Innere Gewässer und Küstenmeere der Souveränität des Küstenstaates unterliegen, darf dieser dort ohne



8.22 > Der Verlauf des Mittelatlantischen Rückens lässt sich auf Island mit bloßem Auge erkennen. Diese Kluft ist entstanden, weil sich hier die Eurasische und die Nordamerikanische Erdplatte voneinander wegbewegen.

Weiteres CCS-Vorhaben genehmigen und nach seinen Vorstellungen regulieren. Komplexer wird die Rechtslage mit Blick auf die an das Küstenmeer angrenzende Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) und den Festlandsockel. Bei ihnen handelt es sich um Zonen, in denen dem Küstenstaat nur einzelne, wenn auch ausschließlich souveräne Rechte und Hoheitsbefugnisse zugewiesen sind. Dazu gehören unter anderem die alleinigen Rechte eines Küstenstaates, auf seinem Festlandsockel in den Meeresuntergrund zu bohren und Tunnel anzulegen. Fachleuten zufolge leitet sich daraus auch das alleinige Recht des jeweiligen Küstenstaates ab, die Speicherung von Kohlendioxid auf seinem Festlandsockel seinem nationalen Recht zu unterwerfen, durch eigene Gesetze zu regulieren und die nationalen Vorgaben durchzusetzen.

In den Zonen der Hohen See und des Tiefseebodens (das sogenannte „Gebiet“) verfügt kein Staat über alleinige Rechte. Auf dem Meer, in der Wassersäule sowie am Meeresboden internationaler Gewässer gilt der Grundsatz der Freiheit der Hohen See. Ausgenommen davon sind die Erforschung und Ausbeutung mineralischer Ressour-

cen am Meeresboden. Diese Tätigkeiten unterliegen der Regulierung und Aufsicht der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) mit Sitz in Kingston (Jamaika).

Die Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund der Hohen See fällt hingegen unter das Regime der Hohen See. Damit hat jeder Staat grundsätzlich das Recht, in internationalen Gewässern Kohlendioxid im Untergrund zu verpressen und zu speichern.

Aspekte des völkerrechtlich verankerten Meeresschutzes

Mit der Unterzeichnung des UN-Seerechtsübereinkommens haben sich alle Vertragsparteien verpflichtet, die Meeresumwelt zu schützen und zu bewahren. Die dazu im Übereinkommen festgeschriebenen Vorgaben gelten für alle Meereszonen und zielen in erster Linie darauf ab, Verschmutzungen des Meeres zu verhindern. Nach ganz überwiegender Ansicht gilt dabei das Vorsorgeprinzip. Das heißt, die Vorgaben zum Meeresumweltschutz werden bereits aktiviert, wenn nur die bloße Möglichkeit einer Verschmutzung besteht.

Lange Zeit war fraglich, ob das Verpressen von Kohlendioxid im Meeresuntergrund als Meeresverschmutzung beziehungsweise als Einbringen von Stoffen zu betrachten ist. Seit dem Jahr 2006 jedoch sind diese Fragen auf internationaler Ebene geklärt: Das Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen – welches die Normen des Seerechtsübereinkommens konkretisiert – erlaubt seitdem die unterirdische Einlagerung von Kohlendioxid im Festlandsockel eines Küstenstaates und in anderen Gebieten des Meeresuntergrundes, vorausgesetzt, die nach jeweiligem nationalem Recht zuständige Behörde erteilt ihre Genehmigung.

Um den Anforderungen des Vorsorgeansatzes Rechnung zu tragen, vereinbarten die Vertragsparteien, spezielle Richtlinien für die Anwendung von CCS zu erarbeiten. In einer neuen Anlage des Londoner Protokolls sind nun drei Voraussetzungen genannt, die bei der Erteilung der erforderlichen Speichergenehmigung zu beachten sind:

- *Erstens* darf Kohlendioxid nur in unterirdische Gesteinsformationen, nicht aber in die Wassersäule eingebracht werden.
- *Zweitens* muss das eingespeicherte Gas zum größten Teil aus Kohlendioxid bestehen.
- *Drittens* verbietet es, dem zur Speicherung vorgesehenen Kohlendioxid weitere Stoffe hinzuzufügen, um diese ebenfalls zu entsorgen.

Das Londoner Protokoll verpflichtet die Vertragsparteien, sicherzustellen, dass diese drei Vorgaben eingehalten werden, wenn eine Speichergenehmigung erteilt wird. Zudem entbindet die Möglichkeit einer Kohlendioxid-einlagerung die Vertragsparteien nicht davon, weitere Anstrengungen zu unternehmen, um die Notwendigkeit der submarinen Speicherung zu verringern.

Sofern das Einbringen von Kohlendioxid in den Meeresuntergrund genehmigungsfähig ist, muss die zuständige staatliche Behörde eine Auflistung aller sonstigen im Kohlendioxid-Strom enthaltenen Stoffe verlangen. Anderenfalls kann sie keine Genehmigung erteilen. Diese Auflistung soll unter anderem Informationen zu Zusam-

mensetzung, Form, Gesamtmenge, Herkunft, Eigenschaften, Toxizität, Beständigkeit und Bioakkumulationspotenzial aller Stoffe enthalten. Ist die vorzulegende Liste unvollständig oder nicht hinreichend genau, sodass keine ausreichende Beurteilung der Gefahren für die menschliche Gesundheit vorgenommen werden kann, darf das Einbringen nicht genehmigt werden.

Das Londoner Protokoll verpflichtet die Vertragsparteien außerdem, eine nationale Aktionsliste zu erstellen. Sie soll beschreiben, wie die infrage kommenden Kohlendioxid-Ströme und deren Bestandteile überprüft werden können – zum einen im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Meeresumwelt. Zum anderen sollen Grenzwerte für jeden Stoff erarbeitet werden, sodass im Einzelfall entschieden werden kann, ob diese eingehalten werden und das Verpressen des Kohlendioxids demnach erlaubt werden kann. Ist dies nicht der Fall, können Auflagen ausgesprochen werden oder aber die Verpressung wird ganz untersagt.

Vorgaben macht das Londoner Protokoll auch zur Auswahl des Speicherortes: So sollen unter anderem die physikalischen, chemischen und biologischen Gegebenheiten in der Wassersäule und im Meeresuntergrund, die Besonderheiten des Standortes sowie die wirtschaftliche und operative Umsetzbarkeit geprüft werden. Bei der Bewertung der potenziellen Auswirkungen einer Kohlendioxideinlagerung sollen nicht nur die Auswirkungen eines Einbringens in den Meeresuntergrund berücksichtigt werden, sondern auch mögliche Entsorgungsalternativen an Land.

Die Auswirkungen einer Kohlendioxid-speicherung und aller damit verbundenen Arbeiten auf die menschliche Gesundheit, die Meeresumwelt und andere Nutzungsmöglichkeiten im Meer sollen möglichst konservativ eingeschätzt werden und auch Unabwägbarkeiten wie Unfälle berücksichtigen. Kommt die Bewertung zu dem Ergebnis, dass die Auswirkungen zu gefährlich sind, soll die Genehmigung versagt werden. Eine Ablehnung ist jedoch nicht zwingend gefordert.

Wird eine Genehmigung für die unterseeische Speicherung von Kohlendioxid erteilt, gebietet das Londoner Protokoll den Aufbau eines Beobachtungs- und Überwachungsprogramms. Dieses soll gewährleisten, dass die zuvor angenommenen Gegebenheiten und Auswirkungen

tatsächlich zutreffen. Erteilte Genehmigungen sollen anhand der Beobachtungsergebnisse fortlaufend überprüft werden. Entsprechen die tatsächlichen Entwicklungen nicht den Annahmen, kann die Genehmigung zurückgezogen werden.

Die Vertragsparteien zum Londoner Protokoll haben zudem ein Rahmenregelwerk zu Risikobewertung und -management bei der Kohlendioxid-speicherung im Meeresuntergrund verabschiedet. Dieses konkretisiert die Anwendung oder die Umsetzung der Beobachtungsaufgaben und soll unter anderem behördliche Entscheidungsfindung unter Bedingungen wissenschaftlicher Unsicherheit erleichtern. Mit Blick auf die Standortwahl verlangt das Regelwerk zum Beispiel, dass die Speicherkapazitäten, die Speichersicherheit, die Nachhaltigkeit und potenzielle Leckagen sowie deren Effekte erfasst werden.

Bei der Bewertung der Folgen für die Meeresumwelt sollen unter anderem die Empfindlichkeit der ansässigen Arten und die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit analysiert und die jeweiligen temporären und räumlichen Reichweiten dargestellt werden. Mithilfe von Kontrollmessungen an der Speicherstätte, im darüberliegenden Meeresuntergrund sowie am Meeresboden sollen Leckagen rechtzeitig erkannt und ihr Auftreten durch präventive, notfalls aber auch durch vorher geplante reaktive Maßnahmen vermieden werden. Auch nach Stilllegung des Bohrlochs soll die Speicherstätte langfristig vor Ort überwacht werden. Mit wachsender Gewissheit, dass das Kohlendioxid nicht aus der Lagerstätte entweicht, kann die Häufigkeit der Messungen dann jedoch Schritt für Schritt verringert werden.

Dürfen Staaten Kohlendioxid zur Verpressung unter dem Meer exportieren?

Von der diskutierten Zulässigkeit der Kohlendioxid-Verpressung im Meeresuntergrund ist die Frage zu unterscheiden, ob abgeschiedenes Kohlendioxid von Völkern wegen zur Speicherung in andere Staaten exportiert werden darf. Nach Artikel 6 des Londoner Protokolls war es den Vertragsparteien prinzipiell verboten, die Ausfuhr von Abfällen und anderen Stoffen in andere Staaten zur Einbringung oder Verbrennung auf See oder im Meeresuntergrund zu gestatten.

Dieser Artikel 6 wurde allerdings im Jahre 2009 mit spezifischem Bezug auf den grenzüberschreitenden Export von Kohlendioxid zur anschließenden Speicherung geändert. Weil die Änderung jedoch noch nicht von einer ausreichenden Zahl von Staaten ratifiziert wurde, ist sie noch nicht in Kraft getreten. Im Jahr 2019 sind die Vertragsparteien des Londoner Protokolls daher gemeinsam übereingekommen, dass der Artikel 6 vorläufig angewendet werden kann.

Die vorläufige Anwendung eines Vertrages setzt allerdings eine entsprechende Erklärung eines Staates voraus. Eine solche liegt bisher nur von Norwegen, den Niederlanden, Dänemark und Südkorea vor; Finnland und Belgien bereiten diese vor (Stand: September 2022). Wollte Deutschland abgeschiedenes Kohlendioxid in einen dieser beiden Staaten exportieren, müsste es dazu ebenfalls die entsprechende Erklärung abgeben. Zudem setzt der geänderte Artikel 6 des Londoner Protokolls auch für den Fall, dass er vorläufig angewendet wird, den Abschluss eines Abkommens zwischen exportierendem und importierendem Staat voraus.

Auf Grundlage dieser rechtlichen Rahmenbedingungen kommen Fachleute zu dem Schluss, dass die Vertragsparteien des Londoner Protokolls alle rechtlichen Voraussetzungen geschaffen haben, dass Kohlendioxid im Meeresuntergrund gespeichert und zu diesem Zweck exportiert werden darf. Die finale Entscheidung über die Zulässigkeit einer Speicherung und eines möglichen Kohlendioxid-Transportes aber wird weiterhin auf nationaler Ebene gefällt.

Wie die rechtlichen Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene umgesetzt werden, hängt für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union derzeit auch noch von der EU-Richtlinie zur Speicherung von Kohlendioxid ab. Diese erlaubt die geologische Speicherung von Kohlendioxid im Hoheitsgebiet der EU-Mitgliedsstaaten, in ihren Ausschließlichen Wirtschaftszonen und in ihren Festlandsockeln im Sinne des UN-Seerechtsübereinkommens. Jedes Speicherprojekt muss jedoch durch die zuständige nationale Behörde genehmigt werden.

Die deutsche Bundesregierung hat diese EU-Richtlinie im August 2012 national unter anderem mit dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) sehr restriktiv umgesetzt. Das Gesetz stellt derzeit auf zweierlei Weise ein

Hindernis für die Durchführung von Kohlendioxid-Speicherprojekten in der deutschen Nord- und Ostsee dar: Es enthält zum einen eine Klausel, wonach Anträge für die Zulassung von Kohlendioxidsspeichern bis zum Ende des Jahres 2016 hätten eingereicht werden müssen. Zum anderen räumt der Bundesgesetzgeber den Bundesländern das Recht ein, bestimmte Gebiete von einer möglichen Kohlendioxidsspeicherung auszunehmen. Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben dieses Recht genutzt, um alle unter ihrer Verantwortung stehenden Meeresgebiete von einer Kohlendioxidsspeicherung im Untergrund auszuschließen. Auf diese Weise haben sie quasi ein Verbot der unterirdischen Kohlendioxidsspeicherung im küstennahen Bereich der deutschen Nord- und Ostsee verhängt.

Paragraph 44 des Kohlendioxid-Speichergesetzes erfordert, dass alle vier Jahre ein Evaluierungsbericht über die Anwendung des Gesetzes und die national und international gewonnenen Erfahrungen zu Carbon Capture and Storage (CCS) erstellt wird. Im aktuellen zweiten Evaluierungsbericht aus dem Jahr 2022 stellen die Autoren und Autorinnen abschließend fest, dass der zu jenem Zeitpunkt gültige deutsche Rechtsrahmen der konkreten Anwendung von CCS in der Praxis entgegensteht. Gleichzeitig zeigt der Bericht auf, dass CCS- und CCU-Technologien in unterschiedlichen Abstufungen dazu beitragen können, dass Deutschland sein Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erreicht.

Welche Bedeutung Verfahren zur Kohlendioxidabscheidung, -speicherung oder anschließender -weiterverarbeitung künftig haben sollen, wird derzeit (Stand: Sommer 2023) in der Debatte um eine deutsche Carbon-Management-Strategie diskutiert. In dieser Strategie sollen denkbare Einsatzfelder für CCU- und CCS-Technologien näher bestimmt sowie die ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für ihren möglichen schnellen und großflächigen Einsatz erarbeitet werden.

Im Zuge dessen empfiehlt die Bundesregierung, das Kohlendioxid-Speichergesetz derart zu erweitern und anzupassen, dass es einen geeigneten Rechtsrahmen für CCS und CCU von der Quelle des Kohlendioxids über dessen Transport bis zur dauerhaften Speicherung und Nutzung bietet. Dieser Rechtsrahmen wird dringend benötigt: Ein Entwurf zur Novelle des deutschen Klima-

schutzgesetzes sieht nämlich vor, dass die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund ein integraler Bestandteil der nationalen Klimapolitik werden soll und erstmals Speicherziele für die Jahre 2035, 2040 und 2045 vorgegeben werden sollen (Stand: Juni 2023). Die Ziele des Klimaschutzes, der Treibhausgasneutralität bis 2045 sowie einer Netto-Kohlendioxid-Entnahme nach dem Jahr 2050 sollen dabei ebenfalls fest im Gesetz verankert werden.

Handlungsdruck entsteht auch durch eine neue Initiative der EU-Kommission. Diese hat im März 2023 angekündigt, bis zum Jahr 2030 geologische Kohlendioxid-speicher für die langfristige Lagerung von 50 Millionen Tonnen Kohlendioxid zu schaffen. Der Plan gehört zum neuen Net-Zero Industry Act der EU-Kommission, in dem CCS als Brückentechnologie für eine nachhaltige Entwicklung aufgeführt wird.

In dem Gesetzesvorschlag sieht die Kommission vor, dass die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union zeitnah Daten über Gebiete veröffentlichen, in denen Kohlendioxid-Speicherstätten genehmigt werden könnten, und jährlich über die Fortschritte bei der Entwicklung von Kohlendioxid-Speicherprojekten auf ihrem Gebiet berichten. Die dafür notwendigen Erkundungs- und Erschließungsarbeiten wiederum sollen erdöl- und erdgasfördernde Unternehmen erbringen und finanzieren. Das heißt im Klartext: Die Öl- und Gasproduzenten werden von der Politik in die Pflicht genommen. Nicht die Staaten, sondern die Unternehmen sollen mehr geologische Speicher erkunden und die benötigten Speicherkapazitäten von mindestens 50 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr zur Verfügung stellen.

Die Reaktionen auf diesen Gesetzesvorschlag waren geteilt. Während CCS-Befürworter die Initiative begrüßten, gaben Kritiker zu bedenken, dass viel wichtiger sei, die Entstehung von Treibhausgasen grundsätzlich zu verhindern. Alle Anstrengungen müssten deshalb in entsprechende Technologien und Verhaltensänderungen investiert werden – und nicht in CCS.

Eines ist sicher: Die politischen und gesellschaftlichen Debatten zu CCS werden in den kommenden Monaten und Jahren weitergehen und mit großer Wahrscheinlichkeit auch zu neuen Regelungen und Gesetzen führen, insbesondere in Deutschland.

CONCLUSIO

Kohlendioxidsspeicherung unter dem Meer: Ein umstrittenes Verfahren im Aufwind

Kohlendioxid lässt sich abscheiden – sowohl direkt aus der Luft als auch aus Abgasströmen. Beide Verfahrensansätze spielen in der Klimapolitik eine zunehmend wichtigere Rolle. Durch ihren Einsatz soll es gelingen, schwer vermeidbare Restemissionen von Industrie und Landwirtschaft auszugleichen oder aber ihre Freisetzung von vornherein zu verhindern. Zudem können auch Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie die viel diskutierte Energie- und Wärmegewinnung in Biomasse-Heizkraftwerken nur dann zu einem Emissionsausgleich beitragen, wenn das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid abgeschieden wird und man es anschließend zu langlebigen Produkten wie Kohlefasern weiterverarbeitet oder aber sicher eingelagert. Daher sind Technologien zur Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) zentral, wenn das Ziel der globalen Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 erreicht werden soll.

Die Zahl der weltweit in Betrieb befindlichen Abscheidungsanlagen steigt: Fraglich ist allerdings, wo das entnommene Kohlendioxid dauerhaft gespeichert werden soll. Fachleute gehen davon aus, dass der größte Teil des Gases nicht langfristig weiterverarbeitet werden kann, sondern stattdessen eingelagert werden muss – bestenfalls unterirdisch, in Gesteinsschichten, die von einer undurchlässigen Deckschicht verschlossen sind, sodass das Kohlendioxid nicht nach oben entweichen kann. An Land stoßen entsprechende Pläne vielerorts auf Widerstand, weil infolge einer Kohlendioxid-Verpressung das Erdbebenrisiko steigen und das Grundwasser verschmutzt werden könnte.

Fachleute suchen deshalb verstärkt nach geeigneten Speichergesteinen im Meeresuntergrund. Infrage kommen sowohl Sandsteinformationen als auch die poröse obere Basaltschicht der Ozean-

kruste. Technologien für eine Kohlendioxidsspeicherung in Sandsteinformationen werden seit dem Jahr 1996 erfolgreich eingesetzt, vor allem in norwegischen Gewässern. In die obere Ozeankruste wird Kohlendioxid bisher nur auf Island injiziert, weil das Basaltgestein dort bis über die Meeresoberfläche hinausragt und leicht zu erreichen ist. Über das Speicherpotenzial von Basaltgesteinen im tiefen Meeresuntergrund hingegen ist noch nicht viel bekannt. Es wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht.

Ein grundlegender Unterschied aber ist bereits bekannt: In Sandstein verpresstes Kohlendioxid verweilt unter Umständen viele Tausend Jahre lang im Porenwasser des Gesteins, bevor es mineralisiert und damit in fester Form sicher gebunden wird. Im reaktionsfreudigen Basaltgestein hingegen laufen die für eine Mineralisierung verantwortlichen Prozesse deutlich schneller ab.

Dennoch ist auch eine Kohlendioxid-Verpressung unter dem Meer nicht ohne Risiken. Lagerstätten müssen daher gründlich erkundet, wohlüberlegt ausgewählt und am Ende über lange Zeit hinweg und umweltschonend (lärm-)überwacht werden. Zudem kann eine Kohlendioxid-Verpressung andere Meeresnutzungsformen in dem betroffenen Gebiet unter Umständen einschränken.

Rechtlich geregelt wird die Kohlendioxidsspeicherung unter dem Meer in erster Linie durch neue Richtlinien im Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Protokoll). Es macht zum Beispiel Vorgaben, was verpresst werden darf und wie eine Überwachung der Lagerstätte sichergestellt werden soll. Die finale Entscheidung über eine Genehmigung für beantragte Projekte obliegt jedoch den staatlichen Behörden, welche auf nationaler Ebene für eine Umsetzung des Londoner Protokolls verantwortlich sind.