

NEGATIVE EMISSIONEN

# Europa und Deutschland als Katalysatoren einer Billionen-Euro-Industrie

Juni 2024

BCG



DVNE

Boston Consulting Group (BCG) unterstützt führende Akteure aus Wirtschaft und Gesellschaft in partnerschaftlicher Zusammenarbeit dabei, Herausforderungen zu meistern und Chancen zu nutzen. Seit der Gründung 1963 leistet BCG Pionierarbeit im Bereich Unternehmensstrategie. Die Boston Consulting Group hilft Kunden, umfassende Transformationen zu gestalten: Die Beratung ermöglicht komplexe Veränderungen, eröffnet Wachstumschancen, schafft Wettbewerbsvorteile, verbessert die Kunden- und Mitarbeiterzufriedenheit und bewirkt so dauerhafte Verbesserungen des Geschäftsergebnisses. Nachhaltiger Erfolg erfordert die Kombination aus menschlichen und digitalen Fähigkeiten.

Die vielfältigen, internationalen Teams von BCG bringen tiefgreifende Expertise in unterschiedlichen Branchen und Funktionen mit, um Veränderungen anzustoßen. BCG verzahnt führende Management-Beratung mit Expertise in Technologie, Digital und Analytics, neuen Geschäftsmodellen und der übergeordneten Sinnfrage für Unternehmen. Sowohl intern als auch bei Kunden setzt BCG auf Gemeinschaft und schafft dadurch Ergebnisse, die Kunden nach vorne bringen.

Der Deutsche Verband für Negative Emissionen (DVNE e.V.) wurde im Juli 2023 als erster nationaler CDR-Verband in der EU gegründet. Der DVNE soll als Multi-Stakeholder-Plattform einerseits die Zusammenarbeit und andererseits die Entwicklung von Maßnahmen in Deutschland unterstützen, um das Netto-Null Ziel bis 2045 zu erreichen und darüber hinaus netto-negativ zu werden.

Das Ziel des DVNE ist es, dem schnell wachsenden Ökosystem in Deutschland eine starke und differenzierte Stimme zu geben und die Öffentlichkeit über negative Emissionen bzw. CO<sub>2</sub>-Entnahme (englisch: CDR) zu informieren.

Gender-Hinweis:

Wenn in dieser Studie aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form (generisches Maskulinum) verwendet wird, sind damit stets wertfrei alle Geschlechter (w/m/d) gemeint.

**NEGATIVE EMISSIONEN**

**Europa und Deutschland  
als Katalysatoren einer  
Billionen-Euro-Industrie**

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Autoren	6
Danksagung	7
Zusammenfassung	8
Zielsetzung dieses Berichts	10
<b>1 CO<sub>2</sub>-Entnahme (CDR) ist entscheidend für den Klimaschutz</b>	<b>12</b>
1.1 CDR ist ein integraler Bestandteil der Eindämmung des Klimawandels	12
1.2 CDR umfasst eine Reihe von Methoden	14
1.3 Starkes CDR-Wachstum erwartet, aber durch derzeitige Hindernisse verzögert	20
<b>2 Überblick über die CDR-Methoden</b>	<b>24</b>
2.1 Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft	24
2.2 Biochar Carbon Removal (BCR)	27
2.3 Beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung (ERW)	30
2.4 Direkte CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS)	33
2.5 Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung (BECCS)	36
2.6 Andere CDR-Methoden, einschließlich ozeanbasierter CDR	39
2.7 Messung, Berichterstattung, Verifizierung (MRV) & Intermediäre	41
<b>3 CDR kann zu einer globalen 470–940 Mrd. Euro-Industrie werden</b>	<b>44</b>
3.1 Globales wirtschaftliches CDR-Potenzial in 2050 von jährlich 470–940 Mrd. Euro	44
3.2 Unterschiede im wirtschaftlichen Potenzial je nach CDR-Methode	48
<b>4 Europa und Deutschland können CDR-Wertschöpfungsketten gestalten</b>	<b>53</b>
4.1 Eine 110-220 Mrd. Euro-Chance für Europa und Deutschland	53
4.2 Potenzial für 95-190 Tsd. CDR-induzierte Arbeitsplätze in Deutschland	58
4.3 Deutschland als Katalysator und Koordinator für CDR	59
<b>5 Entschiedenes Handeln von Politik, Industrie, Käufern und Investoren ist jetzt gefragt</b>	<b>61</b>
5.1 Ein 15-Punkte-Aktionsplan zur Überwindung von CDR-Hindernissen	61
5.2 Politische Entscheidungsträger	65
5.3 CDR-Industrie	67
5.4 CDR-Käufer	68
5.5 Investoren	69
Über die Hauptautoren	72
Glossar	73

# Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (CDR) erweist sich als ein zunehmend notwendiges und praktikables Mittel zur Bekämpfung des Klimawandels. Um die ehrgeizigen Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen, sind Emissionsreduzierungen und -abbau von entscheidender Bedeutung – unterstützt durch massive Anpassungsmaßnahmen (Englisch „Adaptation“), um den schlimmsten Auswirkungen der globalen Erderwärmung entgegenzuwirken.

Die Bemühungen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bleiben weiterhin hinter den Erfordernissen zurück. Um einen 1,5°C-kompatiblen Pfad zu erreichen, müssten wir die Emissionen jährlich um 7 % verringern, während der jüngste Trend einen jährlichen Anstieg von 1,5 % aufweist. Ebenso werden Anpassungsmaßnahmen alleine nicht ausreichen, auch wenn diese dringend notwendig sind; wir können uns nicht aus einer 3°C-Welt heraus anpassen. Jedes sinnvolle langfristige Klimaszenario beinhaltet erhebliche negative Emissionen, um die Treibhausgase in der Atmosphäre wieder auf ein akzeptables Niveau zu bringen.

In diesem Zusammenhang wird die vom Menschen geschaffene Fähigkeit, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen, zu einem entscheidenden Element jeder sinnvollen Klimastrategie. Abgesehen von den potenziellen Auswirkungen auf das Klima bietet die CO<sub>2</sub>-Entnahme auch ein beträchtliches wirtschaftliches Potenzial. In diesem Bericht untersuchen wir dieses Potenzial entlang der Wertschöpfungsketten der verschiedenen CDR-Methoden. Wir beleuchten die Chancen für deutsche und europäische Unternehmen und Länder sowie das Arbeitsplatzpotenzial, das mit der Skalierung der CDR-Industrie verbunden ist.

Die Verwirklichung des in diesem Bericht aufgezeigten Potenzials erfordert entschiedenes und rechtzeitiges Handeln: Politische Entscheidungsträger, CDR-Unternehmen, Zertifikatskäufer und Investoren müssen gemeinsam wirkungsvolle Maßnahmen ergreifen. Nur dann können wir diese Billionen-Euro-Chance auf unserem Weg zu Netto-Null und darüber hinaus realisieren.

Viel Spaß beim Lesen!



Stefan Schlosser  
Geschäftsführer, DVNE



Patrick Herhold  
MD & Senior Partner, BCG

# Autoren

Dieser Bericht wurde vom Deutschen Verband für Negative Emissionen (DVNE) und Boston Consulting Group (BCG) erstellt, mit besonderer Unterstützung mehrerer DVNE-Mitgliedsunternehmen.

## Hauptautoren



Patrick Herhold  
Johanna Pütz  
Karan Mistry

Robin Bierganz  
Phillip Spiekermann  
Louisa Maier

## Co-Autoren



Stefan Schlosser  
Sebastian Hanss-Mirodone



Caroline Braun  
Sarah-Luise Grimm



Nikolaus Wohlgemuth



Jörg zu Dohna  
Marcel Rensmann



Magnus Drewelies



Johannes Schwegler  
Constanze Adolf



Julia Mühleiß



Tony Oehm

# Danksagung

Das Autorenteam bedankt sich herzlich für die Zusammenarbeit und die wertvollen Einblicke, die das DVNE Sounding Board beigetragen hat:

Name	Organisation
Jodok Batlogg	Tree.ly
Mevina Caviezel	CarbonX
Carolin Güthenke	German Biochar
Lisa Mangertseder	Carbon Removal Partners
Sebastian Manhart	DVNE
Dirk Paessler	Carbon Drawdown Initiative
Philipp Rothenberger	Carbon Atlantis
Oscar Schily	Climeworks
Venna von Lepel	Novocarbo

Darüber hinaus danken wir für die unschätzbare Zeit und das Wissen, das folgende Personen uns zur Verfügung gestellt haben:

Name	Organisation
Martin Albicker	Deutsche Energie-Agentur (DENA)
Oliver Geden	Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP)
Pascal Hader-Weinmann	Deutsche Energie-Agentur (DENA)
David Keller	GEOMAR

Schließlich möchten wir Nicole Herold, Elisabeth Harding und Amy Sims für ihre Unterstützung danken.

# Zusammenfassung

Die Entnahme von Kohlendioxid (CDR) ist ein integraler Bestandteil der Eindämmung des Klimawandels

Die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre ist für die Erreichung der globalen Klimaziele von entscheidender Bedeutung – angesichts der Diskrepanz zwischen den Emissionsreduktionszielen und unserer derzeitigen Politik und tatsächlichem Fortschritt, sowie aufgrund der langfristigen Notwendigkeit erheblicher negativer Emissionen. Das Pariser Abkommen hat zwar das weltweite Engagement für eine Begrenzung der Erwärmung auf 1,5°C verstärkt, doch um dies zu erreichen, ist CDR erforderlich, um schwer zu reduzierende Restemissionen, wie im Zementsektor, zu neutralisieren. Alle IPCC-Pfade, die mit 1,5°C oder 2°C vereinbar sind, beinhalten CDR, um eine Welt mit „Netto-Null-Emissionen“ zu erreichen. Um den 1,5°C-Pfad zu erreichen, müssen bis 2050 jährlich etwa 9 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Entnahme erreicht werden.

CDR-Methoden haben spezifische Kombinationen von Vorteilen, Zusatznutzen und Limitationen

Es gibt eine breite Palette von CDR-Methoden, die in drei Kategorien eingeteilt werden können: naturbasierte Entnahme (z. B. Aufforstung), beschleunigte natürliche Prozesse (z. B. beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung oder Biochar Carbon Removal) und technologiebasierte Entnahme (z. B. Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung). Jede Methode unterscheidet sich in Bezug auf Technologieintensität, Dauerhaftigkeit, Skalierbarkeit, Messbarkeit & Verifizierbarkeit und Kosten. Während die meisten naturbasierten Lösungen sofort umsetzbar und kosteneffektiv sind, bieten technologiebasierte Lösungen eine höhere Dauerhaftigkeit der Speicherung, sind aber derzeit teurer und technologisch weniger ausgereift.

CDR kann zu einer globalen, fast eine Billion Euro großen Industrie werden

Das weltweite wirtschaftliche Potenzial von CDR könnte bis 2050 bei einem unter 2°C- bzw. 1,5°C-kompatiblen Pfad 470–940 Mrd. EUR pro Jahr erreichen - so viel wie die heutige globale Luftfahrtindustrie. Dieses Potenzial hängt von erheblichen Kostensenkungen bei allen CDR-Methoden ab, die durch technologische Fortschritte und Skaleneffekte erzielt werden können. So könn-

ten beispielsweise die Kosten für die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS) und die Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) im Vergleich zu 2023 um 50–60 % sinken, während bei der beschleunigten (Gesteins-)Verwitterung (ERW) und Biochar Carbon Removal (BCR) eine Senkung um 35–65 % möglich ist. Umgekehrt könnten die Kosten für naturbasierte CO<sub>2</sub>-Entnahme aufgrund steigender Inputpreise, Flächenkonkurrenz und strengerer Überwachungs- und Berichterstattungsanforderungen steigen.

Europa und insbesondere Deutschland können Katalysatoren für eine florierende CDR-Industrie sein

Die EU-27 und insbesondere Deutschland sind aufgrund ihres technologischen Know-hows, ihrer robusten industriellen Basis und ihrer fortschrittlichen Klimapolitik in einer einzigartigen Position, um den globalen CDR-Markt anzuführen. Deutschlands Verpflichtung zu Netto-Null-Emissionen bis 2045 und seine einflussreiche Rolle in der europäischen Klimapolitik unterstreichen zusätzlich sein Führungspotenzial. Die europäische (deutsche) CDR-Industrie könnte bis 2050 auf 220 Mrd. EUR (70 Mrd. EUR) pro Jahr anwachsen und bis zu 670 000 (190 000) Arbeitsplätze schaffen.

Es sind jetzt mutige und entschlossene Maßnahmen aller Stakeholdergruppen erforderlich

Als Gesellschaft sind wir derzeit noch nicht auf dem Weg, das volle Potenzial von CDR auszuschöpfen. Zwar gibt es deutliche Anzeichen dafür, dass das Interesse an CDR wächst, doch sind noch größere Anstrengungen erforderlich, um seine Vorteile voll auszuschöpfen. Um das volle Potenzial von CDR auszuschöpfen, bedarf es konzertierter Anstrengungen von politischen Entscheidungsträgern, der CDR-Industrie, Käufern und Investoren. Ein 15-Punkte-Aktionsplan umreißt die notwendigen Maßnahmen zur Überwindung der derzeitigen Hindernisse, wie z. B. der regulatorischen Unsicherheit, der hohen Kosten, der technischen Herausforderungen und der begrenzten finanziellen Mittel, um die Skalierung von CDR zu ermöglichen. Die Maßnahmen reichen von spezifischen politischen Maßnahmen über technologische Fortschritte bis zu frühzeitigen, langfristigen Abnahmeverpflichtungen und spezifischen Finanzierungsmechanismen, die gemeinsam das Wachstum der globalen CDR-Industrie unterstützen könnten.





# Zielsetzung dieses Berichts

Mit diesem Bericht werden drei Ziele verfolgt:

- Hauptziel ist es, das wirtschaftliche Potenzial der CO<sub>2</sub>-Entnahme, (*Englisch* „Carbon Dioxide Removal“, CDR) speziell für Europa und Deutschland zu beleuchten.
- Darüber hinaus soll der Bericht einen umfassenden Überblick über die sich schnell entwickelnde CDR-Landschaft geben und gleichzeitig CDR von anderen verwandten Konzepten abgrenzen.
- Schließlich unterstreicht der Bericht die Notwendigkeit eines raschen und entschlossenen Handelns, indem er einen spezifischen, an den Stakeholdergruppen orientierten Aktionsplan zur Verwirklichung des aufgezeigten wirtschaftlichen Potenzials vorlegt.

Der Bericht befasst sich mit der Rolle von CDR bei der Eindämmung des Klimawandels und bewertet verschiedene CDR-Methoden. Er stützt sich auf die bestehende Klimaforschung und verwendet vier verschiedene CDR-Volumenszenarien, um die mögliche Nachfrageentwicklung bis 2050 sowohl unter dem Gesichtspunkt der klimatischen Erfordernisse als


auch der aktuellen Entwicklungen und angekündigten Ziele zu projizieren.

Im Zusammenhang mit Emissionsausgleichszertifikaten sind viele bisherige Berichte bei der Erörterung der Entwicklung von Vermeidungs- (*Englisch* „Avoidance“) und Entnahmezertifikaten (*Englisch* „Removal“) auf einer oberflächlichen Ebene geblieben. Andere haben sich ausschließlich auf die Gesamtnachfrage nach CDR konzentriert, ohne zwischen den möglichen CDR-Methoden zu differenzieren.

In diesem Bericht wird die CO<sub>2</sub>-Entnahme detaillierter untersucht. Der Bericht bietet vier spezifische, denkbare Zusammensetzungen des zukünftigen CDR-Portfolios auf der Grundlage von Kostenerwartungen, regulatorischer Entwicklung und anderen Annahmen.

Um die Diskussionen zu konkretisieren, untersucht der Bericht eine spezifische Kombination aus erforderlichen CDR-Volumina und potenziellen Portfoliozusammensetzungen. Er beleuchtet die wirtschaftlichen Potenziale für Deutschland und Europa und erörtert das Arbeitsplatzpotenzial, das durch das Wachstum von CDR entstehen kann.



A photograph of an industrial facility, likely a power plant or refinery, with several tall smokestacks emitting thick plumes of white smoke that rise into a blue sky with scattered white clouds. In the foreground, there are green trees and a body of water. A large, dark, funnel-shaped cooling tower is visible on the right side of the image.

**Es gibt keinen realistisch  
vorstellbaren Weg zur  
Erreichung unserer  
Klimaziele, der nicht eine  
erhebliche Menge an  
CO<sub>2</sub>-Entnahme beinhaltet.**



# 1 CO<sub>2</sub>-Entnahme (CDR) ist entscheidend für den Klimaschutz

## 1.1 CDR ist ein integraler Bestandteil der Eindämmung des Klimawandels

Die derzeitige Klimapolitik ist noch weit vom 1,5°C-Pfad entfernt

Seit dem Pariser Abkommen von 2015 ist das Ziel, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, das Markenzeichen einer guten Klimapolitik. Obwohl mehr als 96 %<sup>1</sup> der weltweiten Treibhausgase von Ländern emittiert werden, die sich zu diesem Ziel verpflichtet haben, ist die Welt mit ihrer aktuellen Politik noch nicht auf dem richtigen Weg, dieses Ziel zu erreichen. Es besteht eine erhebliche Diskrepanz zwischen unserem aktuellen Kurs, den national festgelegten Beiträgen (NDCs) zur Emissionsreduzierung und den Pfaden, die mit einer

Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 2°C bzw. 1,5°C vereinbar sind.<sup>2</sup> Dies unterstreicht den dringenden Bedarf an mehr politischem Handeln und einem breiteren Spektrum an Maßnahmen.

Alle IPCC-Pfade beinhalten CDR, um bis 2050 netto null zu erreichen

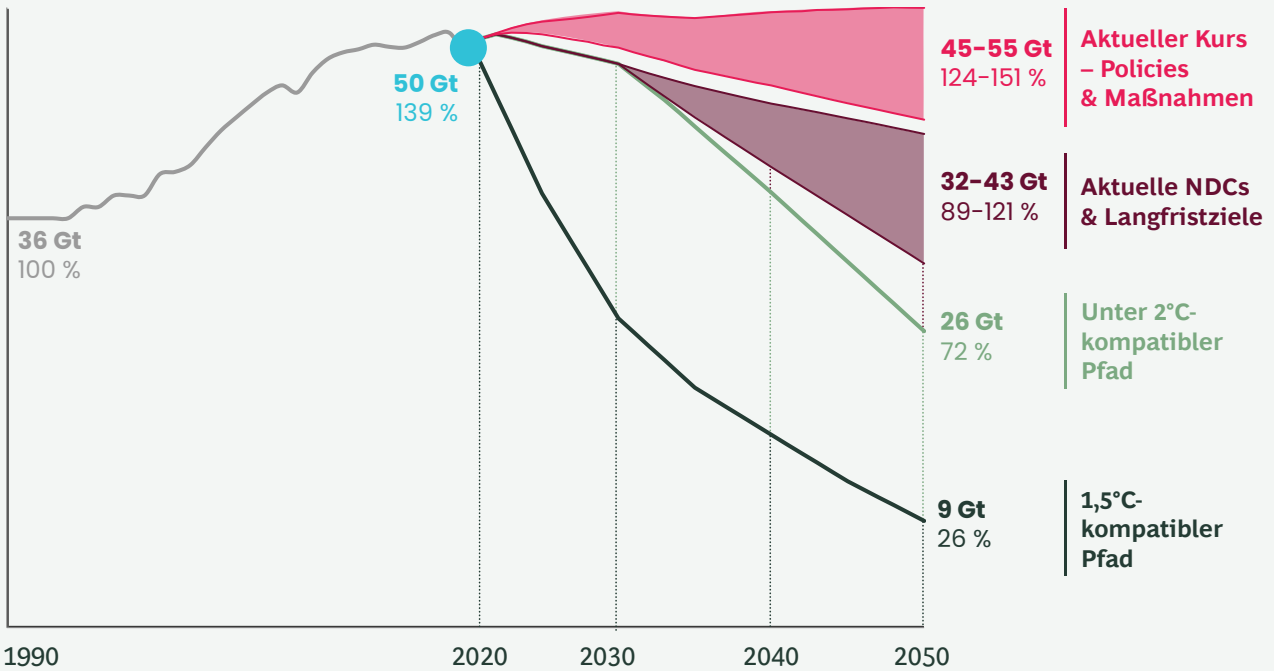
Der Schwerpunkt der aktuellen Klimapolitik liegt auf der Verringerung der Menge an Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen, die in die Atmosphäre gelangen – und das ist auch angemessen. Dies erfordert in erster Linie eine Abkehr von fossilen Brennstoffen in allen Bereichen der Wirtschaft,

<sup>1</sup> World Resources Institute, March 2023.

<sup>2</sup> Lamb et al., 2024.

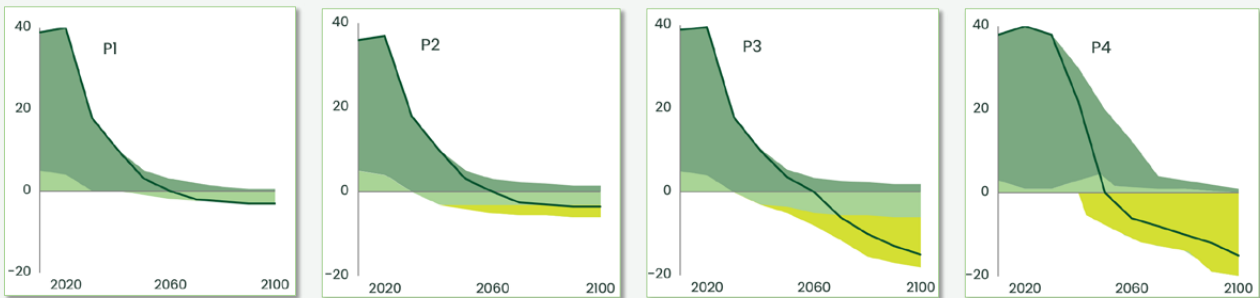
## ABBILDUNG 1

### Globale THG-Emissionen (Gt CO<sub>2</sub>e p.a., indexiert auf 100% basierend auf 1990-Werten)



Anmerkung: National festgelegte Beiträge (NDCs) sind die Klimaschutzpläne der einzelnen Länder zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Rahmen des Pariser Abkommens  
Quelle: IEA; Climate Action Tracker; BCG-Analyse

## ABBILDUNG 2



### Pfad 1

Geringe Energienachfrage, höhere Lebensstandards; CDR nur aus Aufforstung

### Pfad 2

Nachhaltige Konsummuster, begrenzter Anteil technischer CDR-Methoden

### Pfad 3

Begrenzte Nachfrage-reduktion, verstärkte Abhängigkeit von CDR

### Pfad 4

Ressourcen- und energie-intensive Weltwirtschaft, starker Fokus auf CDR

■ Fossile Brennstoffe und Industrie ■ Naturbasierte CO<sub>2</sub>-Entnahme<sup>1</sup> ■ Andere CO<sub>2</sub>-Entnahmen<sup>2</sup> — Netto-THG-Emissionen

- ⊕ **Flexibler Ansatz** durch **Vielzahl von Methoden**, die nicht unbedingt an industrielle Prozesse oder Standorte gebunden sind
- ⊕ Kann sowohl **Residualemissionen aus der Industrie** angehen, die noch emittiert werden, als auch **historisch freigesetztes CO<sub>2</sub>** in der Atmosphäre beseitigen
- ⊕ Kombiniert die Bekämpfung des Klimawandels mit **wirtschaftlichem Potenzial** und der **Schaffung von Arbeitsplätzen**
- ⊖ Sollte als **ergänzende Option** betrachtet werden und nicht substitutiv verwendet werden, wenn Emissionsreduktionen technisch und ökonomisch machbar sind

1. AFOLU in IPCC 2. IPCC-Pfade modellieren nur BECCS – hier nicht weiter differenziert  
Quelle: IPCC AR6 Mitigation of Climate Change; IPCC SR15 special report; BCG-Analyse

Der IPCC definiert CDR als eine bewusste, absichtliche menschliche Aktivität zur Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub>



(CDR) umfasst eine Reihe von Technologien, Praktiken und Ansätzen, die darauf abzielen, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre zu entnehmen und zu speichern, um zu verhindern, dass es weiter zur globalen Erwärmung beiträgt.<sup>3</sup>

einschließlich Stromerzeugung, Verkehr, Gebäude und Industrie. Ferner könnte die Reduzierung auch Lösungen wie die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung an Punktquellen (Englisch „Carbon Capture & Storage“, CCS) umfassen.

Glaubwürdige wissenschaftliche Wege zur Erreichung von Netto-Null (Englisch „Net Zero“) beruhen jedoch nicht allein auf der Emissionsminderung. Emissionsszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der International Energy Agency (IEA) und weiterer Forschungsinstitute besagen, dass die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (oder der oberen Hydrosphäre)<sup>4</sup> dringend erforderlich ist, um die globale Erwärmung zu begrenzen. CDR ist unerlässlich,

<sup>3</sup> Angepasste Definition, basierend auf dem IPCC AR6 WGIII Factsheet.

<sup>4</sup> Im Folgenden werden die Atmosphäre und die obere Hydrosphäre (0-200 m) der Einfachheit halber als gleichwertig betrachtet..

CDR ist...



... notwendig, um den Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration umzukehren und zu stabilisieren



... entscheidend für eine signifikante Abschwächung der Auswirkungen der globalen Erwärmung



... zwingend erforderlich, um ehrgeizige Netto-Null-Emissionsziele zu erreichen

lich, um die Auswirkungen der Restemissionen aus schwer zu dekarbonisierenden Sektoren wie Stahl, Zement, Chemie und Anderen zu neutralisieren. Zudem kann sie historische Emissionen „bereinigen“. Dies ist ein entscheidender Vorteil, da historisch emittiertes Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mehrere Jahrhunderte lang in der Atmosphäre verbleiben kann.<sup>5</sup> Auf die Vielzahl der verfügbaren Entnahmemethoden wird später in diesem Kapitel näher eingegangen.

Alle modellierten IPCC-Pfade, die die globale Erwärmung auf 1,5°C oder unter 2°C begrenzen, beinhalten eine unterschiedliche Menge und ein unterschiedliches Portfolio an CDR, um die verbleibenden Emissionen zu beseitigen, die entweder aufgrund technischer Beschränkungen oder prohibitiver Kosten nicht allein durch Reduktionsmaßnahmen beseitigt werden können (Abbildung 2).

<sup>5</sup> Umweltbundesamt, 2022.

### THG-Emissionsreduktion (CO<sub>2</sub>e)

Technologien, Praktiken und Methoden, um den **CO<sub>2</sub>-Ausstoß in die Atmosphäre zu verringern**

### CO<sub>2</sub>-Entnahme

Technologien, Praktiken und Methoden, um **CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen und zu speichern**

## 1.2 CDR umfasst eine Reihe von Methoden

CDR-Methoden können nach ihrer Technologieintensität kategorisiert werden

Da das Konzept der CO<sub>2</sub>-Entnahme (CDR) noch in der Entstehung ist, gibt es weder ein allgemein anerkanntes Klassifizierungssystem für CDR-Methoden, noch ist die Liste der CDR-Methoden bereits vollständig. In diesem Bericht werden CDR-

Methoden in drei Haupttypen eingeteilt: naturbasierte Entnahme, beschleunigte natürliche Prozesse (Hybrid) und technologiebasierte Entnahme. Naturbasierte Entnahmemethoden umfassen unter anderem den Schutz, die Wiederherstellung oder die Bewirtschaftung von Ökosystemen zur Bindung von Kohlendioxid. Beschleunigte natürliche Prozesse können als hybrid betrachtet werden, da natürliche Mechanismen der Kohlenstoffbindung

Konventionell

Neuartig



## NATURBASIERTE ENTNAHME

### Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft

Aufforstung und Wiederherstellung bestehender Wälder zur Aufnahme von CO<sub>2</sub> durch Photosynthese (inkl. haltbarer Holzprodukte<sup>1</sup>)

### Kohlenstoffbindung im Boden

Umsetzung landwirtschaftlicher Praktiken, zur Verbesserung der Fähigkeit von Böden, Kohlenstoff zu binden

### Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten

Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten in ihren natürlichen Zustand zur Verbesserung ihrer Fähigkeit, Kohlenstoff zu speichern

### Wiederherstellung von Blue Carbon-Ökosystemen

Erhaltung und Wiederherstellung von Küsten-/Meeresökosystemen wie Mangroven, Seegras und Gezeitensümpfen



## BESCHLEUNIGTE NATÜRLICHE PROZESSE (HYBRID)

### Beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung

Verteilung fein gemahlener Silikatgesteine über große Flächen zur chemischen Reaktion mit CO<sub>2</sub> und Bildung stabiler Mineralien

### Biochar Carbon Removal

Umwandlung von Biomasse oder anderem biogenem Material in eine stabile Form von Kohlenstoff, die zur Verbesserung von Böden oder in langlebigen Produkten wie Asphalt oder Zement verwendet wird

### Vergraben von Biomasse

Terrestrisches Vergraben von organischem Material, um Zersetzung und Kohlenstofffreisetzung zu verhindern

### Versenken von Biomasse

Versenkung terrestrischer oder mariner Biomasse im Ozean zur Kohlenstoffbindung am Meeresboden

### Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen

Zugabe von Mineralien zu Ozeanen/Flüssen, um die Alkalinität zu erhöhen und die Fähigkeit des Wassers zur CO<sub>2</sub>-Aufnahme zu verbessern

### Ozeandüngung<sup>2</sup>

Zugabe von Nährstoffen wie Eisen oder Phosphor zu Ozeanen zur Förderung des Phytoplanktonwachstums (welches CO<sub>2</sub> durch Photosynthese aufnimmt)



## TECHNOLOGIEBASIERTE ENTNAHME

### Direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft

Abscheidung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft mit anschließender unterirdischer Speicherung oder Nutzung in langlebigen Produkten<sup>1</sup>

### Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung<sup>3</sup>

Erzeugung von Strom/Wärme oder Biomethan aus Biomasse, Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> oder Nutzung in langlebigen Produkten<sup>1</sup>

### Bio-Öl-Injektion

Umwandlung von Biomasse in Bio-Öl und Injektion in unterirdische geologische Formationen

### Direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean<sup>4</sup>

Energiebetriebene CO<sub>2</sub>-Entnahme direkt aus dem Ozean durch Verwendung von Membran- und Elektrodialysetechnologien

1. Langlebige Holzprodukte und Mineralprodukte werden in anderen Berichten als separate CDR-Methoden betrachtet – hier in der "Utilization Phase" der jeweiligen CDR-Methoden zusammengefasst 2. Enthält künstlichen Auftrieb 3. Derzeit umfasst der Begriff "Bio-CCS" eine Vielzahl von Implementierungsoptionen, die nicht ausschließlich mit der Abscheidung von CO<sub>2</sub> bei der Energieerzeugung zusammenhängen – in dieser Studie verwenden wir BECCS und beziehen thermische Abfallverwertung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung sowie Biogasanlagen mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung, Verflüssigung und Speicherung ein 4. Inkludiert Direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean sowie elektrochemische Ozean-Entnahme  
Quelle: IPCC; Experteninterviews; BCG-Analyse

ABBILDUNG 4

		Konventionell				Beschleunigte		
CDR-Methode	Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft		Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten		Beschleunigte (Gesteins-) Verwitterung		Vergraben von Biomasse	
		Kohlenstoffbindung im Boden	Wiederherstellung von Blue Carbon-Ökosystemen		Biochar Carbon Removal			
<b>Eigenschaften</b>								
Technologische Intensität	Naturbasierte CO <sub>2</sub> -Entnahme				Beschleunigte natürliche			
Ort	Land	Land	Land	Ozean	Land	Land	Land	
Abscheidungsmechanismus	Biologisch	Biologisch	Biologisch	Biologisch	Geochemisch	Biologisch	Biologisch	
Kohlenstoffspeicherpool	Biosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	Biosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	Biosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	Hydrosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	Hydrosphäre (Mineralien)	Biosphäre & Lithosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	Biosphäre (Vegetation, Böden & Sedimente)	
<b>Qualitativer Vergleich</b>								
Dauerhaftigkeit (Permanenz)	Jahrzehnte bis Jahrhunderte	Jahrzehnte bis Jahrhunderte	Jahrzehnte bis Jahrhunderte	Jahrzehnte bis Jahrhunderte	>10 Jahrtausende	>10 Jahrtausende <sup>1</sup>	Jahrzehnte bis Jahrhunderte	
CO <sub>2</sub> -Entnahmepotenzial	Groß	Mittel	Mittel	Gering	Groß	Mittel	Mittel	
MRV Umsetzbarkeit	Mittel	Schwierig	Schwierig	Schwierig	Schwierig	Mittel	Mittel	
Aktuelle (technologische) Skalierbarkeit	Hoch	Hoch	Hoch	Niedrig	Mittel	Hoch	Niedrig	
Kosten 2050 (€/Tonne CO <sub>2</sub> )	<100	<100	<100	10 150	50 200	50 160	N.A.	

1. Eine Dauerhaftigkeit von >10 Jahrtausenden gilt insbesondere für Inertinite Biokohle  
 Quelle: IPCC; DVNE Arbeitsgruppe; Experteninterviews; Bustamante et al. 2024; Rhodium Group (Jones et al. 2024); IVL (Bednar et al. 2023); State of CDR (Geden et al. 2024); BCG-Analyse



Neuartig							CDR-Methode
Versenken von Biomasse	Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen	Ozeandüngung	Direkte CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS)	Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung (BECCS)	Bio-Öl-Injektion	Direkte CO <sub>2</sub> -Entnahme aus dem Ozean	
							Eigenschaften
Natürliche Prozesse (Hybrid)			Technologiebasierte CO <sub>2</sub> -Entnahme				Technologische Intensität
Ozean	Ozean	Ozean	Land	Land	Land	Ozean	Ort
Biologisch	Geochemisch	Biologisch	Geochemisch	Biologisch	Biologisch	Geochemisch	Abscheidungsmechanismus
Hydrosphäre (Meeres-sedimente)	Hydrosphäre (Mineralien)	Hydrosphäre (Meeres-sedimente)	Biosphäre (Geologische Formationen)	Biosphäre (Geologische Formationen)	Biosphäre (Geologische Formationen)	Hydrosphäre (Geologische Formationen)	Kohlenstoff-speicherpool
Qualitativer Vergleich							
Jahrhunderte bis Jahrtausende	>10 Jahr-tausende	Jahrhunderte bis Jahrtausende	>10 Jahr-tausende	>10 Jahr-tausende	>10 Jahr-tausende	>10 Jahr-tausende	Dauerhaftigkeit (Permanenz)
Groß	Groß	Groß	Groß	Groß	Mittel	Groß	CO <sub>2</sub> -Entnahme-potenzial
N.A.	Schwierig	Schwierig	Einfach	Einfach	Einfach	Mittel	MRV Umsetzbarkeit
Niedrig	Niedrig	Niedrig	Mittel	Mittel	Mittel	Niedrig	Aktuelle (technologische) Skalierbarkeit
N.A.	40 260	50 500	100 400	50 250	N.A.	N.A.	Kosten 2050 (€/Tonne CO <sub>2</sub> )

durch technologische Mittel oder erhebliche menschliche Eingriffe erweitert werden, um die Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> zu beschleunigen bzw. zu verbessern. Bei der technologiebasierten Entnahme werden vom Menschen entwickelte Technologien eingesetzt, um CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre abzuscheiden und dauerhaft zu speichern. Dieser Bericht konzentriert sich auf CDR-Methoden, die in der Literatur häufig beschrieben werden, wie Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft, Biochar Carbon Removal oder Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung.<sup>6</sup> Abbildung 3 gibt einen detaillierten Überblick über die CDR-Methoden in den drei Kategorien. Eine alternative Kategorisierung bezieht sich auf naturbasierte Entnahme als „konventionelle“ CDR-Methoden, während sowohl beschleunigte natürliche Prozesse als auch technologiebasierte Entnahme unter „neuartige“ CDR-Methoden subsumiert werden - diese Kategorisierung wurde als Referenz in den Abbildungen 3 und 4 hinzugefügt, aber im Rest des Dokuments nicht verwendet.

CDR-Methoden können sich erheblich voneinander unterscheiden. Jede CDR-Methode nutzt einen anderen Abscheidungsprozess und einen anderen Kohlenstoffspeicherpool, hat eine andere technologische Intensität (siehe oben) und wird an Land oder in der Meeresumwelt angewandt. Abgesehen von der grundsätzlichen Funktionsweise hat jede CDR-Methode eine Reihe einzigartiger Vor- und Nachteile.

<sup>6</sup> IPCC AR6 Mitigation of Climate Change; The State of Carbon Dioxide Removal, 2024.

## 1.3 Starkes CDR-Wachstum erwartet, aber durch derzeitige Hindernisse verzögert

Alle Szenarien gehen von einem starken CDR-Wachstum aus, aber das Gesamtvolumen ist ungewiss

Der derzeitige Markt für CDR ist winzig, und obwohl die Prognosen auf einen soliden Aufwärtstrend hindeuten, bleibt die Gesamtentwicklung des CDR-Volumens unsicher. Auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt (*Englisch* „Voluntary Carbon Market“) im Jahr 2023 entfielen nur 0,015 Gt des gesamten Zertifikatsvolumens auf CO<sub>2</sub>-Entnahmen.<sup>7</sup> In dieser Studie werden ca. 2,2 Gt CO<sub>2</sub> an naturbasierten Entnahmen in den nationalen Treibhausgasinventaren der Länder nicht als

<sup>7</sup> Voluntary Carbon Market 2023 Review, Climate Focus.

Die wichtigsten Kriterien, die zur Beschreibung und zum Vergleich verschiedener CDR-Methoden herangezogen werden, sind:

- **Dauerhaftigkeit:** Beschreibt die Zeitskala der CO<sub>2</sub>-Speicherung und ist eine wichtige Maßnahme, um sicherzustellen, dass die CO<sub>2</sub>-Entnahme nicht rückgängig gemacht wird (auch „Permanenz“).
- **Entnahmepotenzial:** Beschreibt das theoretische globale Potenzial einer Methode zur Entnahme von CO<sub>2</sub>, z. B. angesichts der geologischen Grenzen der Erde.
- **Umsetzbarkeit der Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV):** Beschreibt den erforderlichen Aufwand, um das durch eine bestimmte Methode entfernte CO<sub>2</sub> nachweisbar zu messen und zu verfolgen.
- **Aktuelle (technologische) Skalierbarkeit:** Beschreibt den Reifegrad einer CDR-Methode, z. B. die Skalierbarkeit über eine Labortestumgebung hinaus.
- **(Erwartete) Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub>-Entnahme:** Beschreibt die Kosten für die Erstellung eines verifizierten Zertifikats für die Entnahme einer Tonne CO<sub>2</sub> durch eine bestimmte Methode.

Abbildung 4 gibt einen umfassenden Überblick über alle CDR-Methoden und ihre Bewertung anhand obiger Kriterien.

Ausgangspunkt berücksichtigt, da sie keine Zusätzlichkeit (*Englisch* „Additionality“) besitzen.<sup>8</sup> Das Wachstum von CDR hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter technologische Fortschritte, politische und regulatorische Unterstützung, Investitionen des öffentlichen und privaten Sektors sowie die Entwicklung der Infrastruktur für eine starke Skalierung. Die Diskrepanzen zwischen den Volumensszenarien ergeben sich hauptsächlich aus den unterschiedlichen Temperaturzielen, den unterschiedlichen Annahmen über die Emissionsreduzierung und den verschiedenen Methoden, die bei diesen Szenarien verwendet werden.

<sup>8</sup> The State of Carbon Dioxide Removal, 2024.

Die Projektionen dieses Berichtes beruhen auf einer Synthese von Forschungsarbeiten, Meta-Analysen von Reduktionspfaden und internationalen politischen Verpflichtungen.<sup>9</sup> Vier verschiedene Pfade können das potenziell erforderliche globale CDR-Volumen veranschaulichen (Abbildung 5). Ihre Herleitung und ihre Auswirkungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 1. Aktueller Kurs

Auf der Grundlage der bestehenden Verpflichtungen und Zusagen wird bis 2050 ein CDR-Volumen von etwa 0,75 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr prognostiziert. Diese Projektion stützt sich auf globale Nachfrageprognosen für dauerhafte („durable“) CDR und wird extrapoliert, um CDR mit geringerer Dauerhaftigkeit einzubeziehen.<sup>10</sup>

### 2. Aktuelle NDCs und Langfristziele

Das erwartete CDR-Volumen auf der Grundlage von 111 bestehenden national festgelegten Beiträgen (NDCs) und allen langfristigen Minderungsstrategien bis November 2023 (COP28) könnte bis 2050 ein Volumen von etwa 1,75 Gt CO<sub>2</sub> erreichen.<sup>11</sup>

### 3. Unter 2°C-kompatibler Entnahmepfad

Um den Temperaturanstieg auf unter 2°C zu begrenzen, könnte ein CDR-Volumen von etwa 4,5 Gt CO<sub>2</sub> p. a. im Jahr 2050 erforderlich sein. Es besteht jedoch erhebliche Unsicherheit über die genaue Menge an CDR, die erforderlich ist, um die Ziele von unter 2°C zu erreichen. Die Analyse der entsprechenden Szenarien in der IPCC AR6-Szenario-Datenbank zeigt eine Spanne von 0,92–11 Gt CO<sub>2</sub>.<sup>13</sup> Angesichts der Tatsache, dass der Medianwert von 4,5 Gt CO<sub>2</sub> einen mehr als 2,5-fachen Anstieg des für 2050 erwarteten Volumens im Vergleich zu den Projektionen auf der Grundlage der aktuellen NDCs und langfristigen Minderungsstrategien darstellt, erfordert die Erreichung dieses Ziels erhebliche Investitionen und konzertierte Maßnahmen aller Stakeholder.

### 4. 1,5°C-kompatibler Entnahmepfad

Um einen 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad zu erreichen, muss CDR bis 2050 jährlich etwa 9 Gt CO<sub>2</sub> erreichen. Die in den verschiedenen Szenarien des IPCC AR6 angegebene Bandbreite ist enorm und reicht von 3,5–18 Gt CO<sub>2</sub>.<sup>13</sup> Der Median von 9 Gt CO<sub>2</sub> weist auf eine

<sup>9</sup> Lamb et al., 2024, Prütz et al., 2023, Fuss et al., 2018, IPCC AR6.

<sup>10</sup> The Time for Carbon Removal Has Come, 2023.

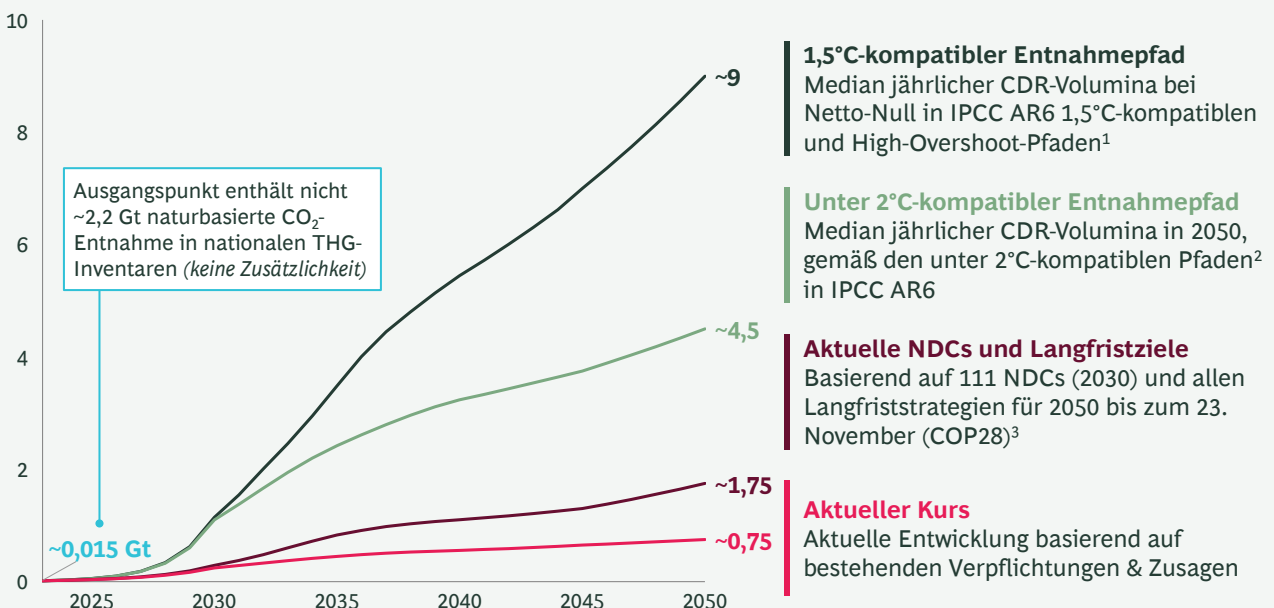
<sup>11</sup> Lamb et al., 2024.

<sup>12</sup> Lamb et al., 2024.

<sup>13</sup> Ruben Prütz et al., 2023.

## ABBILDUNG 5

### Erforderliches globales CDR-Volumen in verschiedenen Szenarien (Gt CO<sub>2</sub> p.a., 2023-50)



1. Ruben Prütz et al.: Analyse von 83 1,5°C-kompatiblen und High-Overshoot-Szenarien der IPCC AR6 WGIII 2. Lamb et al.: Analyse von Szenarien in den Kategorien C1 und C3 der IPCC AR6 Szenariodatenbank 3. Lamb et al.; Annahme, dass Länder ohne eine quantifizierbare Strategie ihr aktuelles Volumen konventioneller landbasierter CDR-Methoden beibehalten

Anmerkung: Die Varianz des CDR-Volumens in den IPCC AR6-Pfaden zeigt unterschiedliche Annahmen über das Ausmaß der Emissionsreduktion Quelle: IPCC AR6 WGIII Chapter 12; Ruben Prütz et al. 2023 Environ. Res. Commun.; Lamb et al. 2024, Nature Climate Change; IEA Net Zero Roadmap; BCG CDR Marktmodell

erhebliche Lücke zwischen den Pfaden 1 bis 3 und dem notwendigen CDR-Volumen zur Erreichung des 1,5°C-Klimaziels hin. Er unterstreicht die Notwendigkeit erheblicher Fortschritte bei den Emissionsreduktionstechnologien und einer soliden finanziellen und politischen Unterstützung, um CDR-Methoden wirksam zu skalieren.

Das künftige CDR-Volumen, sowohl insgesamt als auch für einzelne CDR-Methoden, ist noch äußerst unklar. Von den vier oben beschriebenen Szenarien konzentriert sich dieser Bericht auf die 1,5°C- und unter 2°C-kompatiblen Entnahmepfade. Der unter 2°C-kompatible Entnahmepfad bietet eine realistische Perspektive angesichts historischer Entwicklungen und aktueller Hindernisse, während der 1,5°C-kompatible Entnahmepfad ein ehrgeiziges Ziel darstellt, das mit der bestehenden Klimapolitik in Einklang steht. Dieser Ansatz schafft ein Gleichgewicht zwischen Praktikabilität und der Notwendigkeit entschiedener Maßnahmen zur Erreichung ambitionierter Klimaziele.

Für die Zusammensetzung des CDR-Portfolios sind mehrere langfristige Szenarien denkbar

Das CDR-Volumen ist ungewiss, ebenso wie die künftige Zusammensetzung des globalen CDR-Portfolios. Daher werden in diesem Bericht vier denkbare Szenarien entwickelt (Abbildung 6). Naturbasierte Entnahmen wie Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserte Forstwirtschaft dominieren den Markt und machen heute 92 % des CDR-Portfolios aus.<sup>14</sup> Dieser hohe Anteil ist auf ihre erwiesene Skalierbarkeit und ihre relativ geringen Kosten zurückzuführen. Ihre begrenzte Permanenz und die potenzielle Landnutzungskonkurrenz mit der Landwirtschaft unterstreichen jedoch die Notwendigkeit, weitere CDR-Methoden zu entwickeln und die Diversifizierung des globalen Portfolios voranzutreiben. Abhängig von der allgemeinen Marktnachfrage und davon, wie schnell neuartige CDR-Methoden die Kosten senken und die Herausforderungen der Messbarkeit, Berichterstattung und Verifizierbarkeit (*Englisch* „Measurement, Reporting, Verification“, MRV) bewältigen können, könnte das künftige CDR-Methodenportfolio deutlich vielfältiger sein.

<sup>14</sup> Climate Focus, 2023; CDR.fyi, 2023.

## ABBILDUNG 6

### CDR-Portfolio (2050-Szenarien in % des Gesamtvolumens p.a.)

Global

#### Legende

- Noch nicht entwickelte Technologien
- Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft
- Andere Methoden<sup>1</sup>
- Ozeanbasierte Methoden<sup>2</sup>
- Beschleunigte (Gesteins-) Verwitterung
- Biochar Carbon Removal
- DACCS
- BECCS

#### Zentrale Annahmen

Kostenreduktion technologiebasierte Entnahmen vs. 2023	20-40 %	40-60 %	20-40 %	60-80 %
Regulatorische Durchsetzung dauerhafter CDR-Methoden	Schwach	Mäßig	Mäßig bis stark	Stark
Infrastrukturausbau (CO <sub>2</sub> -Pipelines, Erneuerbare)	Langsam	Mäßig bis schnell	Langsam bis mäßig	Schnell
Glaubwürdigkeitsverbesserung, z.B., für MRV intensive CDR	Hoch für Aufforstung, niedrig für alle anderen	Niedrig	Hoch	Mittel
Zahlungsbereitschaft für Durchschnitts-CDR-Portfolio	Niedrig	Mittel bis hoch	Mittel	Hoch

1. Beinhaltet Kohlenstoffbindung im Boden, Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten 2. Beinhaltet Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen, Ozeandüngung, Wiederherstellung von Blue-Carbon-Ökosystemen, Direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean

Anmerkung: Zahlen gerundet

Quelle: IPCC AR6 WGIII Chapter 12; IEA Net Zero Roadmap; Climate Focus, Voluntary Carbon Market 2023 Review; BCG CDR Marktmodell

Im Szenario „Hoher Anteil natürlicher Senken“ bleibt die Abhängigkeit von naturbasierter Entnahme mit 75 % hoch, was die Vorteile von CDR-Methoden wie Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserter Forstwirtschaft oder der Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten aufgrund ihres Reifegrads und ihres geringeren Investitionsbedarfs hervorhebt. Dieses Szenario steht jedoch vor dem Problem, dass die Dauerhaftigkeit der Speicherung verhältnismäßig gering ist, was die globale langfristige Wirksamkeit der jeweiligen CO<sub>2</sub>-Entnahme gefährdet. Außerdem ist es aufgrund der zunehmenden Landnutzungskonkurrenz und der Kosten für die Landbewirtschaftung nicht mit dem hohen CDR-Volumen vereinbar, das für unter 2°C- und 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfade erforderlich ist.

Das Szenario „Ausgewogenes Portfolio“, das in diesem Bericht als Referenz für die Zusammensetzung des CDR-Portfolios verwendet wird, geht einerseits von einem ungefähr gleichen Anteil an naturbasierten Methoden und andererseits beschleunigten natürlichen Prozessen und technologiebasierten Methoden aus. In diesem Szenario wird ein Anteil von 50 % für naturbasierte CDR erwartet, während Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) 20 % und Biochar Carbon Removal (BCR) CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS) jeweils 10 % beitragen. Dieses Szenario spiegelt unter anderem eine beträchtliche, aber begrenzte Kostendegression der technologiebasierten CO<sub>2</sub>-Entnahme, einen moderaten Ausbau der Infrastruktur und eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für hochwertige CO<sub>2</sub>-Entnahme wider. Diese Zusammensetzung des Portfolios für das Jahr 2050 wird in dieser Studie als Referenz herangezogen, da sie den Einschränkungen jedes einzelnen Ansatzes standhält, an veränderte Bedingungen anpassbar ist und weniger von neuen Technologien und deren schneller Skalierung sowie Kostensenkung abhängt. Außerdem könnte es die durchschnittliche Dauerhaftigkeit der CO<sub>2</sub>-Entnahme erheblich verbessern und die Abhängigkeit von natürlichen Senken verringern, wobei anerkannt wird, dass diese ein wesentlicher Teil der Gesamtlösung bleiben könnten.

Das Szenario „Langsame Kostendegression“ geht von einer begrenzten Kostendegression bei technologiebasierten Entnahmeverfahren wie DACCS und BECCS in Verbindung mit Beschränkungen aus, die sich aus dem langsamen Aufbau der erforderlichen Infrastruktur ergeben, z. B. erneuerbare Energieversorgung oder CO<sub>2</sub>-Pipelines und qualifizierte Speicherstätten. In diesem Szenario sind die beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung (ERW) und BCR mit einem Anteil von insgesamt 35 % am glo-

## Mehrere Hindernisse verhindern derzeit ein beschleunigtes Wachstum der CDR-Industrie

Trotz der dringenden Notwendigkeit, CDR weltweit zu skalieren, und des enormen wirtschaftlichen Potenzials stehen der Verwirklichung derzeit mehrere Hindernisse im Weg.

1. **Unklarer politischer Status** und Rolle von CDR in den nationalen Strategien der Länder zur Eindämmung des Klimawandels
2. **Hohe Kosten**, insbesondere im Vergleich zu Vermeidungszertifikaten, und oft CAPEX-lastige Technologien
3. **Einige im Entstehen begriffene Technologien** mit Herausforderungen in Bezug auf Effizienz, Messbarkeit und Verifizierung
4. **Finanzierungslücke**, insbesondere für Unternehmen in der Wachstumsphase, die Investitionsentscheidungen für Projekte verhindert
5. **Komplexe Genehmigungsverfahren** für den Anlagenbetrieb und die (grenzüberschreitende) Transport- und Lagerinfrastruktur

balen CDR-Portfolio stärker vertreten, da sie ohne nennenswerte Infrastrukturabhängigkeit skaliert werden können. Geht man von einer begrenzten Kostendegression für DACCS und BECCS aus, so tragen diese beiden Verfahren jeweils nur 5 % bei.

Das Szenario „Technologieintensive Entnahme“ weist mit 37,5 % den höchsten Anteil an CDR aus DACCS und BECCS sowie beträchtlich hohe Anteile an ERW und BCR auf. Gleichzeitig ist der Anteil der naturbasierten Entnahmeverfahren im Vergleich zu den anderen Szenarien geringer. Dieses Szenario würde hohe Investitionen, bedeutende technologische Durchbrüche zur Senkung der Kosten und eine solide politische Unterstützung für die technologiebasierte Entnahme erfordern. Es legt den Schwerpunkt auf CDR-Methoden mit hoher Dauerhaftigkeit, erfordert jedoch erhebliche Vorabinvestitionen.

Da sowohl im Szenario „Langsame Kostendegression“ als auch im Szenario „Technologieintensive Entnahme“ stark auf teilweise neu entstehende Technologien gesetzt wird, ist das „Ausgewogene Portfolio“ die gewählte Referenzzusammensetzung des CDR-Portfolios für 2050 und für den Rest dieses Berichts.

Um einen unter 2°C- oder 1,5°C-kompatiblen CDR-Pfad zu erreichen, müssen die noch in der Entwicklung befindlichen Methoden den Gigatonnen-Bereich erreichen

Die Kombination der insgesamt erforderlichen CDR-Volumenentwicklung (Abbildung 5) und der „ausgewogenen Portfoliozusammensetzung“ (Abbildung 6) zeigt das absolute Volumen, das für jede CDR-Methode erwartet werden kann. Um den unter 2°C- oder 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad zu erreichen, müssen mehrere neue CDR-Methoden auf hunderte Megatonnen oder Gigatonnen skaliert werden (siehe Abbildung 7). Um diese Herausforderung und Größenordnung zu verdeutlichen: Im Jahr 2023 entfiel auf BCR der größte Teil (93 %) aller CDR-Zertifikatslieferungen ohne naturbasierte Entnahme (125.100 Tonnen).<sup>15</sup> Dies entspricht etwa 116.000 Tonnen CO<sub>2</sub> durch BCR. BCR könnte bis 2050 im unter 2°C- bzw. im 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad bei ausgewogener Portfoliozusammensetzung 450–900 Mio. t CDR pro Jahr ausmachen. Dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 39–43 % über die nächsten 25 Jahre – höher als die jährliche Wachstumsrate der globalen PV-Industrie in einem Jahrzehnt weniger (ca. 38 % p. a., 2007-22).<sup>16</sup>

<sup>15</sup> CDR.fyi 2023 Year in Review.

Die Erweiterung bereits skalierbarer CDR-Methoden, wie z. B. der naturbasierten Entnahme, und die Weiterentwicklung neu entstehender Technologien sind entscheidend für die Einhaltung der Ziele des Pariser Abkommens. Die im Folgenden beschriebenen Entwicklungen sind unsicher, und die historischen Trends der letzten Jahrzehnte deuten nicht auf einen 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad hin (siehe Abbildung 1). Zusätzlich stehen der beschriebenen Entwicklung von CDR derzeit mehrere Hindernisse im Weg (siehe Infokasten auf Vorseite). Der Bericht geht auf diese Hindernisse näher ein und beschreibt in Kapitel 5 die erforderlichen Maßnahmen, um sie zu überwinden.

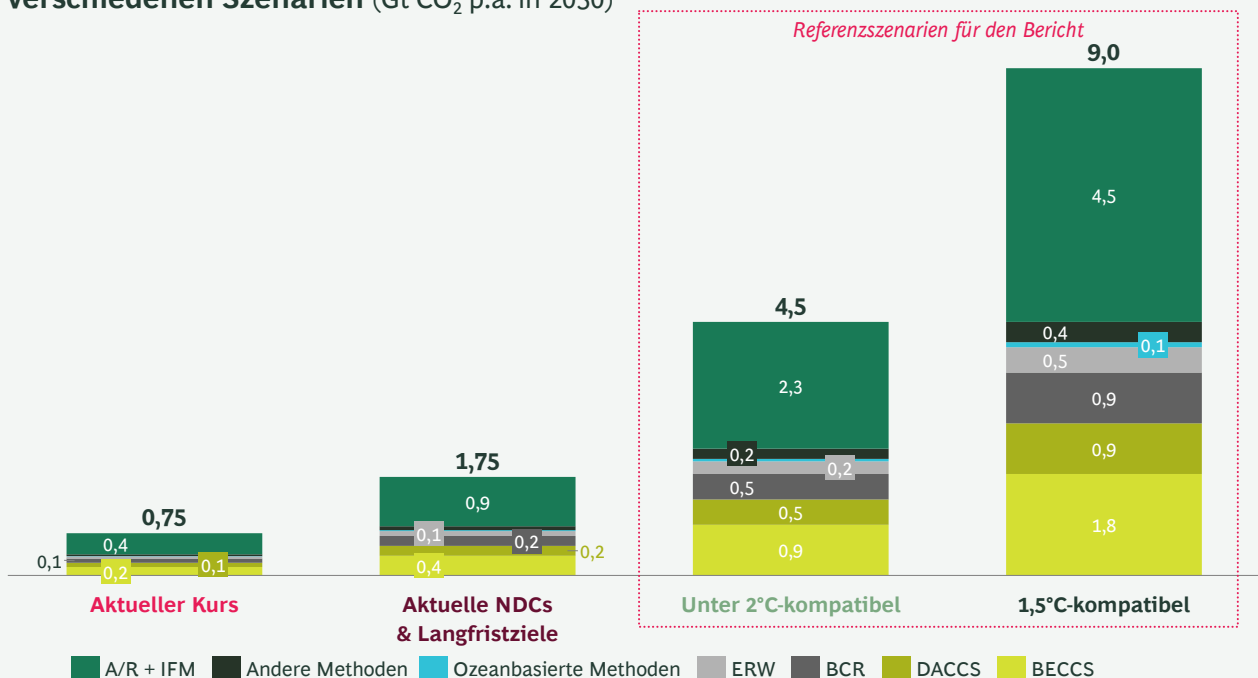
Das folgende Kapitel befasst sich eingehender mit ausgewählten CDR-Methoden, insbesondere mit denjenigen, die bis 2050 voraussichtlich die Hauptbestandteile des globalen CDR-Portfolios sein werden. Dabei handelt es sich um Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft, beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung (ERW), Biochar Carbon Removal (BCR), direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS) und Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS).

<sup>16</sup> Solar Power Europe, 2023.


## ABBILDUNG 7

### Erforderliches globales CDR-Volumen nach Methode in verschiedenen Szenarien (Gt CO<sub>2</sub> p.a. in 2050)

Global Ausgewogenes Portfolio



Anmerkung: Zahlen gerundet; Zahlen <0.1 zur Lesbarkeit nicht angezeigt; CDR-Volumen p.a. definiert als gelieferte CO<sub>2</sub>-Entnahmen  
 Quelle: IPCC AR6 WGIII Chapter 12; IEA Net Zero Roadmap; Climate Focus, Voluntary Carbon Market 2023 Review; Ruben Prütz et al. 2023 Environ. Res. Commun.; Lamb et al. 2024, Nature Climate Change; BCG CDR Marktmodell

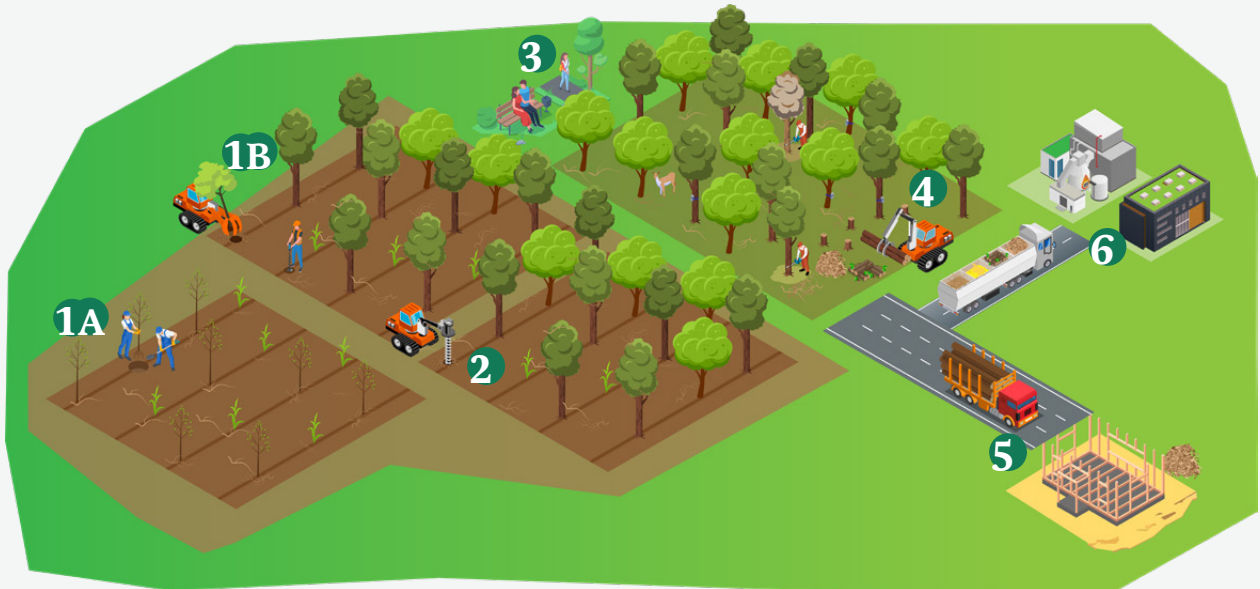
An aerial photograph of a dense forest with a central lake. The trees are in various shades of green, and the water is a deep blue. The text is overlaid on the image in white, bold font.

**Um den immensen Bedarf  
an CO<sub>2</sub>-Entnahme zu decken,  
reicht eine einzige Methode  
nicht aus.**

**Ein vielfältiges Portfolio ist  
unerlässlich, da jeder Ansatz  
seine eigenen Vorteile und  
Einschränkungen mit sich bringt.**

## 2 Überblick über die CDR-Methoden

### 2.1 Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft



Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserte Forstwirtschaft verbessern die Kohlenstoffspeicherung durch die Wiederherstellung und Bewirtschaftung von Waldökosystemen. Bei der Aufforstung werden neue Wälder auf nicht bewaldeten Flächen gepflanzt, bei der Wiederaufforstung werden geschädigte Wälder wiederhergestellt, und durch eine verbesserte Forstwirtschaft wird die Kohlenstoffspeicherung in bestehenden Wäldern optimiert. Diese Methoden unterstützen die Artenvielfalt, die Wasserregulierung und die Klimaresistenz.

Wichtige Prozessschritte:

1. Anpflanzung von Bäumen
  - 1 a. In Gebieten, die bisher nicht von Bäumen bedeckt waren: Identifizierung und Auswahl geeigneter Flächen, die zuvor unfruchtbar waren oder für andere Zwecke genutzt wurden. Bodenuntersuchung, Rodung und Planung zum Anlegen neuer Wälder.
  - 1 b. In zuvor zerstörten Waldgebieten oder bestehenden Wäldern: Konzentration auf degradierte oder abgeholzte Gebiete in bestehenden Wäldern. Bewertung des Waldzustands, Auswahl geeigneter Baumarten und strategische Anpflanzung zur Wiederherstellung der Baumdichte und zur Förderung der Tierwelt.
2. Neupflanzung von Baumsetzlingen je nach Waldzustand: Regelmäßige Überwachung des Waldzustands vor Ort und mit Hilfe von Software, Bewertung des Wachstums, der Gesundheit und der Überlebensrate der Bäume sowie der Zunahme des gespeicherten  $\text{CO}_2$ . Neupflanzung von Setzlingen bei Bedarf, Schutz der jungen Bäume vor Schädlingen.



3. Nutzung von Schutzwäldern für die biologische Vielfalt, Nichtholzprodukte aus dem Wald und für die Freizeit: Ausweisung von Gebieten zur Förderung der biologischen Vielfalt, die Lebensräume und Waldprodukte wie Früchte und Heilpflanzen bieten.
4. Ernte von produktivem Waldholz: Anwendung nachhaltiger Erntemethoden wie selektiver Abholzung zur Gewinnung von Holz ohne Beeinträchtigung der Waldgesundheit.
5. Verwendung von Holzprodukten für den Bau und andere langlebige Produkte: Geerntetes Holz wird zu langlebigen Gütern wie hochwertigen Baumaterialien verarbeitet, die langfristig Kohlenstoff binden.
6. Verwendung von Holzabfällen in anderen CDR-Verfahren und in der chemischen Industrie: Wiederverwendung von Restholz und Abfallprodukten für die Biokohleproduktion, BECCS und die chemische Industrie, um den Nutzen der Biomasse zu maximieren, die Abfallmenge zu reduzieren und das Kohlenstoffbindungspotenzial zu erhöhen.

Die Wertschöpfungskette beginnt mit der Auswahl geeigneter Setzlinge und der Beschaffung von Düngemitteln wie Substraten auf Biokohlebasis zur Verbesserung der Bodenqualität, die auf die lokalen Klima- und Bodenbedingungen abgestimmt sind. Die Wahl der Setzlinge wirkt sich sowohl auf die Kosten als auch auf den Umweltnutzen aus. Monokulturen mit Bäumen wie Eukalyptus oder Akazie mögen zwar günstig sein, können aber der Artenvielfalt schaden - je vielfältiger und lokaler die ausgewählten Baumarten sind, desto höher ist der wirtschaftliche Ertrag. In der Phase der Standortwahl und Projektentwicklung werden die Umweltauswirkungen, der Nutzen für die biologische Vielfalt, die Auswirkungen auf die (lokale) Gemeinschaft und die langfristige Flächennutzung bewertet und Verträge mit den Lieferanten ausgehandelt, um eine kontinuierliche Versorgung mit den erforderlichen Rohstoffen sicherzustellen.

## ABBILDUNG 8

### Illustrative Wertschöpfungskette für Aufforstung/Wiederaufforstung



Die Vorbereitung des Standorts und die Bepflanzung erfordern eine detaillierte Planung der Zufahrtswege, des Wassermanagementsystems und der optimalen Baumabstände. Danach folgt die eigentliche Pflanzung der Bäume und die Überwachung der Einhaltung von Umweltstandards und Vorschriften. Pflege und Neupflanzung sind entscheidend für die nachhaltige Gesundheit des Waldes; dazu gehört die regelmäßige Überwachung des Baumwachstums, der Bodengesundheit, der Artenvielfalt und des gespeicherten CO<sub>2</sub> mit Hilfe digitaler Instrumente. Dort, wo die Setzlinge nicht gedeihen, wird nachgepflanzt, und es werden adaptive Managementpraktiken eingeführt, um Herausforderungen wie invasive Arten und Waldbrände zu bewältigen. Die Pflanz- und Pflegearbeiten sind in der Regel stark auf Handarbeit angewiesen, insbesondere bei Projekten im globalen Süden. Auch wenn Maschinen und Ausrüstungen in Zukunft eine größere Rolle spielen werden, könnte die Entwicklung der Arbeitskosten ein entscheidender Faktor für die Projektkosten sein.

Wälder werden in der Phase des CO<sub>2</sub>-Transports und der Speicherung für verschiedene Zwecke bewirtschaftet. Schutzwälder unterstützen die biologische Vielfalt; sie bieten zudem verschiedene Waldprodukte und Erholungsmöglichkeiten. Nutzwälder werden nachhaltig für den Bau und die industrielle Nutzung geerntet, wobei das Restholz für Biokohle, BECCS und andere Anwendungen wiederverwendet werden kann.

### **+** Vorteile:

- Unmittelbar verfügbar für die Umsetzung
- Kostengünstig, insb. niedrige CAPEX
- Einfache Skalierbarkeit je nach verfügbarer Fläche

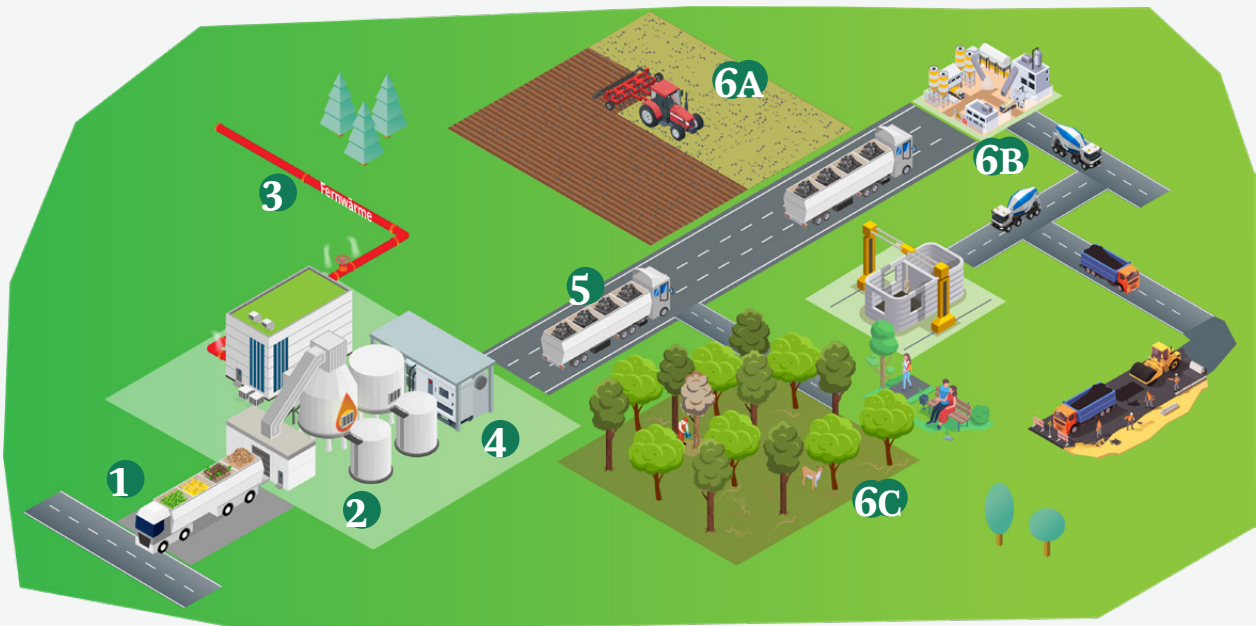
### **+** Zusatznutzen:

- Verbesserung der biologischen Vielfalt des umgebenden Ökosystems
- Verbessertes Kohlenstoff- und Nährstoffrecycling im Boden
- Unterstützung von Konzepten der Kreislaufwirtschaft, z. B. nachhaltiger Bausektor
- Verbessertes Wassermanagement
- Zusätzliche Einkommensquelle für ländliche Bevölkerung

### **-** Beschränkungen und Risiken:

- Flächenkonkurrenz, Begrenzung der Flächen für biologische Vielfalt und Nahrungsmittel
- Glaubwürdigkeitsrisiko angesichts der jüngsten Skandale aufgrund unzureichender Messbarkeit und Überwachung
- Möglicherweise reversibel, z. B. durch Waldbrände, Verbisschäden oder Verschiebung von Klimazonen, die zum Absterben von Bäumen führen

## 2.2 Biochar Carbon Removal (BCR)



Der Prozess der Pyrolyse erzeugt durch ein technisches Verfahren qualitativ hochwertige Biokohle aus Biomasse. Biokohle wird auch als Pflanzenkohle bezeichnet. Während Biokohle und Pflanzenkohle das Produkt als solches bezeichnen, zielt der Report auf den Prozess der CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Biokohleherstellung, (Englisch „Biochar Carbon Removal“, BCR) ab. Der englische Begriff und die zugehörige Abkürzung werden fortlaufend verwendet.

Beim kommerziellen BCR besteht der größte Teil der Biokohle aus sogenanntem Inertinit, einer äußerst langlebigen und stabilen Form von Kohlenstoff. Reine inertinitische Biokohle kann mehr als 10 Jahrtausende überdauern.<sup>17</sup>

### Wichtige Prozessschritte:

1. Transport von Biomasse(resten) zur Fabrik/Pyrolyseanlage: Sammlung und Transport von Biomasse, wie land- und forstwirtschaftlichen Abfällen, zu einer Pyrolyseanlage.
2. Betrieb der Biokohleproduktionsanlage (BPU) zur Umwandlung von Biomasse in Biokohle: Betrieb der BPU unter kontrollierten Bedingungen zur Umwandlung von Biomasse in Biokohle durch Pyrolyse. Dieser Prozess findet hauptsächlich in Abwesenheit von Sauerstoff statt, was zu einer stabilen Kohlenstoffbindung führt.
3. Erzeugung von erneuerbarer Wärme als Nebenprodukt: Erfassung und Nutzung von Wärme, die als Nebenprodukt während des Pyrolyseprozesses entsteht, z. B. für Fernwärme.

<sup>17</sup> Sanei et al., 2024.

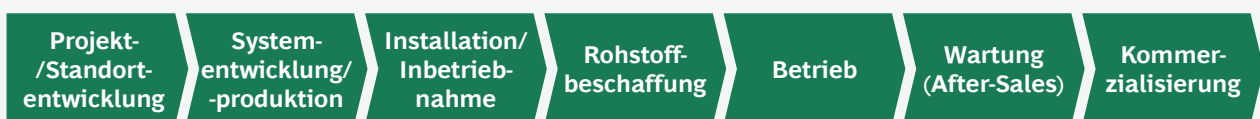
4. Verarbeitung von Biokohle: Verarbeitung der hergestellten Biokohle zur Verbesserung ihrer Eigenschaften, damit sie leichter zu handhaben, zu transportieren und in verschiedenen Anwendungsfällen einzusetzen ist.
5. Transport von Biokohle zum Bestimmungsort: Transport von verarbeiteter Biokohle zu ihrem Bestimmungsort, z. B. zu landwirtschaftlichen Feldern oder Industrieanlagen, in Lastwagen oder mit anderen Transportmitteln.
6. Verwendung von Biokohle
  - 6 a. Zur Verteilung auf landwirtschaftlichen Flächen als Bodenverbesserer: Verteilung von Biokohle auf landwirtschaftlichen Flächen zur Verbesserung der Bodengesundheit, der Wasserrückhaltung und der Nährstoffverfügbarkeit, wodurch die Ernteerträge gesteigert und nachhaltige Anbaumethoden gefördert werden können.

- 6 b. Als Zusatzstoff in Baumaterialien: Biokohle wird als Zusatzstoff in Baumaterialien wie Beton, Asphalt oder Polymeren verwendet. Sie trägt dazu bei, Kohlenstoff in langlebigen Produkten zu binden, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Bauprojekten zu verringern und möglicherweise die Eigenschaften von Baumaterialien zu verbessern.
- 6 c. In kommunalen/städtischen Grünanlagen in der bebauten Umgebung.

Die Wertschöpfungskette für BCR beginnt mit der Ermittlung und Vorbereitung geeigneter Standorte für Biokohleproduktionsanlagen (BPUs) in der Nähe von Quellen biogener Reststoffe oder in der Nähe von Wärmeabnehmern und der Sicherung der erforderlichen Umweltgenehmigungen. Es folgen die Systemtechnik und die Produktion, einschließlich der mechanischen, elektrischen und softwaretechnischen Entwicklung der BPUs, einschließlich ihrer Herstellung, Montage und Abnahmeprüfung der Anlage, um die Installationsbereitschaft zu gewährleisten.

## ABBILDUNG 9

### Illustrative Wertschöpfungskette für Biochar Carbon Removal



*Berücksichtigt bei der Quantifizierung des Wertschöpfungspotenzials*

Die BPU's werden während der Installation und Inbetriebnahme in den Standort des Kunden integriert, wobei die mechanischen und elektrischen Systeme feinabgestimmt und die Einheiten in Betrieb genommen werden. Eine Schulung des Teams vor Ort gewährleistet einen effektiven Betrieb. Bei der Beschaffung von Rohstoffen werden geeignete Biomasse, wie z. B. forstwirtschaftliche und pflanzliche Abfälle, Industrierückstände, Biofeststoffe und Lebensmittelrückstände, gesammelt, die als Rohmaterial für die Biokohleproduktion dienen.

In der Betriebsphase wandeln BPU's Biomasse unter kontrollierten Bedingungen in Biokohle um, um den Kohlenstoffgehalt und die Haltbarkeit zu maximieren. Unterschiedliche Verfahrenstechniken führen zu einer unterschiedlich langen Haltbarkeit der Biokohle, wobei die wichtigsten Faktoren die Temperatur und der Sauerstoffgehalt im Reaktor sowie die Art der verwendeten Biomasse sind. Während frühere Studien, darunter auch IPCC-Veröffentlichungen, die Dauerhaftigkeit von BCR mit Jahrhunderten bis Jahrtausenden bezifferten, baut dieser Bericht auf den neuesten Forschungsergebnissen auf und qualifiziert die Dauerhaftigkeit von BCR als über 10 Jahrtausende lang.<sup>18</sup> Dies gilt für reine iner-

tinitische Biokohle, die nach jüngsten Forschungsergebnissen mehr als 75 % der kommerziellen Biokohle ausmacht.<sup>19</sup> In den Normen sind Mindestwerte für die Pyrolysetemperatur und andere Parameter festgelegt. Die Biokohle wird dann für landwirtschaftliche oder industrielle Anwendungen weiterverarbeitet. Eine regelmäßige geplante sowie schnelle ungeplante Wartung ist entscheidend, um Ausfälle der Anlagen zu vermeiden und eine kontinuierliche, zuverlässige Produktion zu gewährleisten.

In der Kommerzialisierungsphase wird Biokohle schließlich auf landwirtschaftlichen Feldern als Bodenverbesserer oder als Zusatzmaterial für Beton, Asphalt oder andere bautechnische Anwendungen eingesetzt. Überschüssige thermische und elektrische Energie, die während des Verkohlungsprozesses erzeugt wird, kann verkauft werden, was die wirtschaftliche Rentabilität des Betriebs erhöht. Es ist anzumerken, dass das wirtschaftliche Potenzial der überschüssigen Energie (Wärme/Strom) sowie der verbesserten landwirtschaftlichen Erträge nicht quantifiziert wurde (siehe Systemgrenzen in Kapitel 3).

<sup>18</sup> IPCC AR6 Mitigation of Climate Change.

<sup>19</sup> Sanei et al., 2024.

### + Vorteile:

- Flexibel skalierbar je nach Nachfragevolatilität
- Dezentralisierte Verfügbarkeit, Integration in bestehende Standorte
- Verwendung von kostengünstigem Input (Ernterückstände usw.)

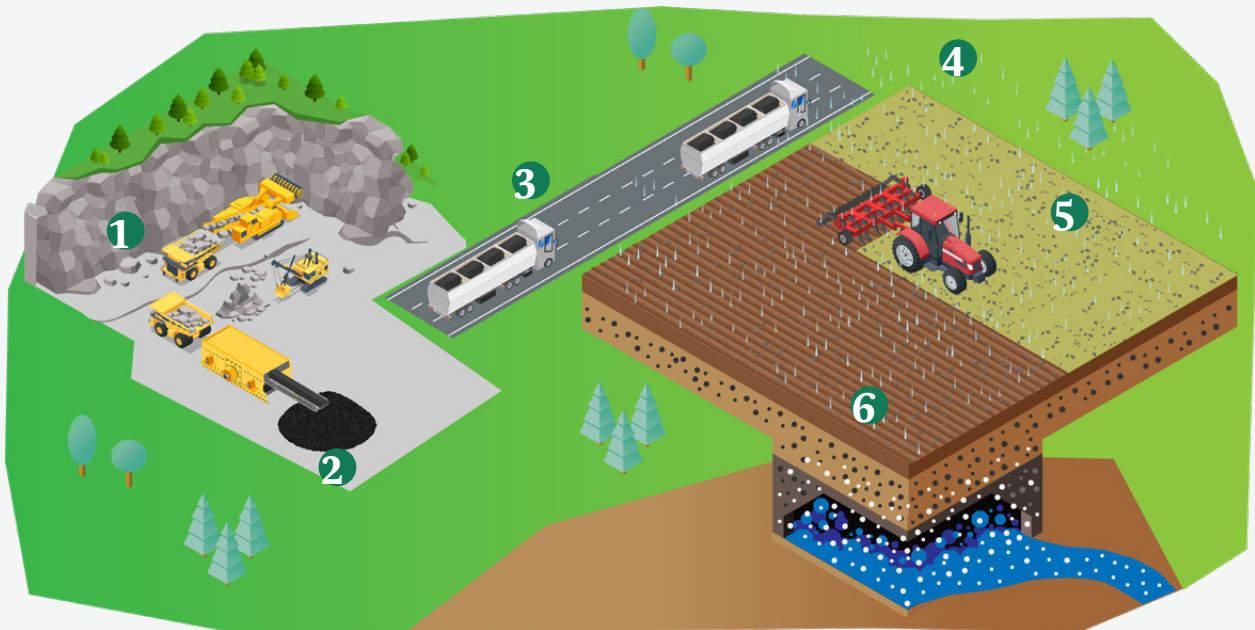
### + Zusatznutzen:

- Verbesserte Bodengesundheit, Wasser- und Nährstoffrückhaltung
- Erzeugung erneuerbarer Energie bei gleichzeitiger Beseitigung von CO<sub>2</sub>
- Beseitigung von überschüssigen Ernte-/Biomasserückständen
- Verringerung der Emissionen in CO<sub>2</sub>-intensiven Industrien durch Ersatz von fossilem Kohlenstoff; Vermeidung von Verrottung, Kompostierung und Verbrennung (Freisetzung von CO<sub>2</sub>)

### - Beschränkungen und Risiken:

- Potenzieller lokaler Wettbewerb um Ausgangsstoffe
- Komplexe Genehmigungsverfahren für den Betrieb von Pyrolyseanlagen

## 2.3 Beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung (ERW)



Die beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung (*Englisch* „Enhanced Rock Weathering“, ERW) beschleunigt den natürlichen Prozess der Mineralverwitterung, um CO<sub>2</sub> zu binden. Fein gemahlenes Silikatgestein wie Basalt wird auf dem Boden verteilt, wo es mit Regenwasser reagiert und stabile Karbonatminerale bildet. Diese Methode bindet CO<sub>2</sub> und verbessert die Bodenfruchtbarkeit, was sie zu einem skalierbaren und umweltfreundlichen Ansatz macht. Industrielle Nebenprodukte wie Schlacke aus der Eisen- und Stahlproduktion können alternativ zu Gesteinsmehl als Ausgangsmaterial verwendet werden. Es wird jedoch überwiegend Gesteinsmehl verwendet und daher in dieser Studie ausschließlich betrachtet.

### Wichtige Prozessschritte:

- 1.** Beschaffung von Gestein oder „Bergbaustaub“ aus Steinbrüchen: Beschaffung von Silikatmineralien, in der Regel Basalt, aus Steinbrüchen, einschließlich der Ermittlung geeigneter Steinbrüche und Umweltverträglichkeitsprüfungen, um eine minimale Störung der Ökosysteme zu gewährleisten.
- 2.** Verarbeitung des abgebauten Gesteins zu feinem Pulver: Zerkleinern und Mahlen des abgebauten Gesteins zu einem feinen Pulver, um die Oberfläche zu vergrößern und den chemischen Verwitterungsprozess bei der Aufbringung auf den Boden zu beschleunigen.
- 3.** Transport von Gesteinsmehl auf umliegende Felder: Transport von fein gemahlenem Gesteinsmehl zu landwirtschaftlichen Feldern oder anderen Einsatzorten.

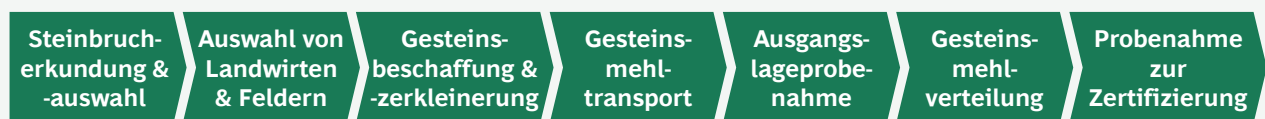
4. Verteilung von Gesteinsmehl auf Felder durch Landwirte: Zur Verteilung des Gesteinsmehls auf die Felder der Landwirte werden handelsübliche landwirtschaftliche Geräte wie z.B. Kalkstreuer verwendet. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung auf der Bodenoberfläche.
5. Reaktion von Wasser mit Gesteinsmehl zur Bildung von Karbonaten: Reaktion des verteilten Gesteinsmehls mit Wasser und CO<sub>2</sub> im Boden unter Bildung stabiler Bikarbonationen. Diese chemische Reaktion bindet Kohlenstoff in einer stabilen Form.
6. Auswaschen von gelösten Karbonaten in Flüsse und schließlich in die Ozeane: Gelöste Bikarbonate werden durch das Grundwasser in Flüsse und schließlich in Ozeane gespült, wo der Kohlenstoff über Jahrtausende hinweg dauerhaft gespeichert wird und dazu beiträgt, die Versauerung der Ozeane abzumildern.

Die Wertschöpfungskette für eine beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung beginnt mit der Erkundung und Auswahl von Steinbrüchen. Dazu gehört die Identifizierung geeigneter Steinbrüche anhand geologischer und klimatischer Kriterien und die Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen, um eine minimale Störung des Ökosystems zu gewährleisten. Basalt zum Beispiel ist ein gängiges industrielles Nebenprodukt aus dem Bergbau und eignet sich besonders gut für die beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung.

Der nächste Schritt ist die Auswahl von Landwirten und Feldern. Dazu müssen die Landwirte in der weiteren Umgebung von Steinbrüchen kontaktiert werden, in der Regel mit Hilfe von Bauernverbänden. Sobald die Felder aufgrund ihres Alkaligehalts, des Bodens, der Anbauform und anderer Faktoren ausgewählt sind, können vertragliche Vereinbarungen zwischen dem ERW-Betreiber und den Landwirten getroffen werden.

## ABBILDUNG 10

### Illustrative Wertschöpfungskette für beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung



 Berücksichtigt bei der Quantifizierung des Wertschöpfungspotenzials

Anschließend erfolgt die Gesteinsbeschaffung und Zerkleinerung, wobei das Gestein aus Steinbrüchen gewonnen und zu feinem Pulver verarbeitet wird. Gesteinsstaub als Nebenprodukt ist oft leicht verfügbar. Ansonsten wird das Gestein zerkleinert, um das Pulver zu erzeugen. Das Gesteinsmehl wird dann vom Steinbruch zu den umliegenden Feldern transportiert. Dies erfordert eine Routenplanung und Koordination, um eine effiziente Lieferung des Gesteinsmehls zu gewährleisten.

Bevor das Gesteinsmehl verteilt werden kann, müssen Bodenproben entnommen werden, um eine Ausgangsbasis für die Messung der Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Bindung zu schaffen. Anschließend streuen die Landwirte das Gesteinsmehl mit handelsüblichen landwirtschaftlichen Geräten aus und sorgen für eine gleichmäßige Abdeckung, um die Wirksamkeit des Verwitterungsprozesses zu maximieren. Wenn die Landwirte nicht in der Lage sind, das Gesteinsmehl zu verteilen, können sie gegen einen geringen Aufpreis Lohnunternehmer beauftragen.

Schließlich werden zur Zertifizierung wiederholt Boden- und Wasserproben entnommen, um das absorbierte CO<sub>2</sub> zu quantifizieren. Dieser Schritt ist entscheidend für die Überprüfung der Wirksamkeit des beschleunigten (Gesteins-) Verwitterungsprozesses und die Einhaltung der Standards für die CO<sub>2</sub>-Entnahme. Die Proben werden in der Regel über einen Zeitraum von zehn Jahren in Abständen von 1–2 Jahren entnommen. Die Proben werden zur Analyse an Labore geschickt, was mit erheblichen Kosten verbunden ist. Die Komplexität der Entnahmemessung und das Fehlen einer standardisierten Mess-, Berichts- und Verifizierungsmethodik (MRV) treiben derzeit die Kosten für ERW-Akteure in die Höhe. Sobald eine standardisierte Methodik eingeführt ist und die Anforderungen für die Probenahme gelockert werden, z. B. durch sensor- oder simulationsgestützte MRV, könnten die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Entnahme durch ERW erheblich gesenkt werden.

### Vorteile:

- Ermöglicht die teilweise Substitution von chemischen Düngemitteln
- Breite Anwendbarkeit für verschiedene Arten von Grundstücken
- Ergänzend zu den üblichen landwirtschaftlichen Praktiken
- Verwendung von ansonsten verfühltem Bergbau-Nebenprodukt

### Zusatznutzen:

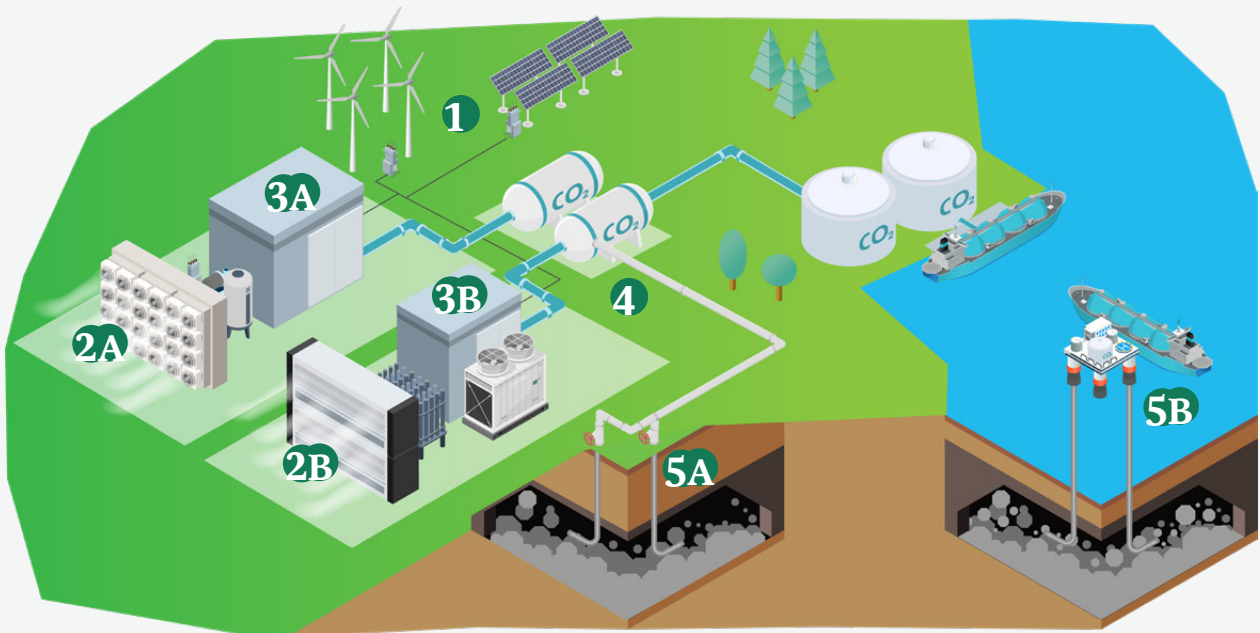
- Verbessertes Pflanzenwachstum und Ertrag (z. B. pH-Regulierung und Nährstoffe)
- Geringere Erosion durch Bodenverdichtung
- Verbesserte Wasserrückhaltung im Boden
- Senkung der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft durch Ersatz von CO<sub>2</sub>-intensiven Anwendungen zur pH-Kontrolle

### Beschränkungen und Risiken:

- Negative Auswirkungen des Bergbaus, z. B. Bodenerosion, wenn Gesteinsmehl nicht bereits als Nebenprodukt verfügbar ist
- Auswirkungen von Gesteinsstaub bei der Ausbringung auf den Boden auf die Luftqualität
- Langsame Reaktionsgeschwindigkeiten zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung und komplexes MRV
- Potenzielle Schwermetallanreicherung



## 2.4 Direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS)



Bei der direkten CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (Englisch „Direct Air Carbon Capture and Storage“, DACCS) wird CO<sub>2</sub> mit Hilfe chemischer oder physikalischer Verfahren direkt aus der eingesaugten Umgebungsluft abgeschieden. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird unterirdisch in geologischen Formationen langfristig gespeichert oder in langlebigen Produkten verwendet. Diese Technologie ist äußerst wirksam bei der Verringerung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Werte, insbesondere aus schwer zu dekarbonisierenden Sektoren, da für diese eine hochqualitative Entnahme sowie langfristige Speicherung erwartet wird.

### Wichtige Prozessschritte:

1. Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen: Erneuerbare Energiequellen wie Wind oder Sonne erzeugen den Strom, der für die Versorgung des DAC-Systems benötigt wird.
2. Einströmen von Umgebungsluft:
  - 2 a. Liquid Solvent DACCS: Umgebungsluft wird durch große Lüfter horizontal eingesaugt (ein vertikaler Einlass ist auch möglich).
  - 2 b. Solid Sorbent DACCS: Die Umgebungsluft wird über Adsorptionsventilatoren in das Luftkontaktsystem eingesaugt (in der Regel mit horizontalem Einlass).
3. Reaktion von CO<sub>2</sub> mit dem Sorbenten und Regeneration des Sorbenten:
  - 3 a. Liquid Solvent DACCS: Reaktion von CO<sub>2</sub> mit einem chemischen Lösungsmittel (Sorptionmittel) im Absorptionsprozess, Regeneration des Lösungsmittels durch eine elektrochemische Zelle.

3 b. Solid Sorbent DACCS: Sättigung des Feststoffsorbentens mit CO<sub>2</sub>, Regeneration in einer Vakuum-Dampfkammer (Desorption).

4. Konzentration und Verdichtung des CO<sub>2</sub>-Stroms: Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird komprimiert und für den Transport oder die Lagerung vorbereitet.
5. Speicherung von CO<sub>2</sub> in unterirdischen geologischen Formationen:
  - 5 a. Vor-Ort- und standortnahe Speicherung von komprimiertem CO<sub>2</sub> in unterirdischen geologischen Formationen.
  - 5 b. Pipelinetransport von CO<sub>2</sub> zu einem zentralen Speicher-Hub, möglicherweise mit anschließender Verschiffung und Speicherung in geologischen Formationen im Meeresboden.

Die Wertschöpfungskette für DACCS beginnt mit der Beschaffung spezifischer Materialien und Komponenten, die für jede Art von System erforderlich sind. Es gibt eine große Vielfalt an unterschiedlichen DAC-Verfahren. Neben anderen technischen Kriterien lassen sie sich vor allem nach dem Abscheidemechanismus (Art und Material des

Sorbenten), dem Regenerationsmechanismus für den Sorbenten (z. B. unterschiedliche Temperaturen, Vakuumbedingungen, Feuchtigkeit usw.) und der Art der Zyklen kategorisieren. Sie können auch unterschiedliche Betriebsmittel wie Säuren, Basen oder alkalische Feststoffe erfordern. In dieser Studie werden zwei spezifische Beispiele verwendet: (1) DACCS mit Feststoffsorbentens unter Verwendung von aminfunktionalisierten oder anderen porösen Substraten, die in einer Vakuumumgebung mit Dampf von 80–100°C regeneriert werden, und (2) DACCS mit flüssigen Lösungsmitteln mit Natriumhydroxid (NaOH) oder Kaliumhydroxid (KOH) als Lösungsmittel und elektrochemischer Sorbentregeneration ohne Wärmezufuhr. Die Wahl des technologischen Ansatzes wirkt sich auf die Kosten der chemischen Medien, die erforderliche Temperatur und Energieintensität für die Abscheidung sowie die entstehenden Prozessabfälle aus.

Als Nächstes werden die Konstruktion und die Beschaffung von Komponenten für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung durchgeführt. Für DACCS mit Feststoffsorbentens werden Adsorptionsgebläse, Luftkontaktoren, Vakuumpumpen, Dampferzeuger (z.B. Hochtemperatur-Wärmepumpe) und Hilfsgeräte benötigt. Für DACCS mit flüssigen

## ABBILDUNG 11

### Illustrative Wertschöpfungskette für DACCS (Solid Sorbent und Liquid Solvent)



Lösungsmitteln werden Absorbergehäuse, Verpackungsmaterialien, Pumpen, Anlagenhilfsmittel und Komponenten für die elektrochemische Zelle benötigt. Die Montagephase umfasst den Bau von Adsorptionseinheiten und Desorptionsvakuumkammern für DACCS mit Feststoffsorbenten bzw. von Absorbereinheiten und elektrochemischen Zellstapeln für DACCS mit flüssigen Sorptionsmitteln. Es folgen die Standortentwicklung und der Anlagenbau, der Anschluss der Hauptkomponenten an die Medienversorgung und die Zugabe des entsprechenden Sorbenten oder Lösungsmittels in das System.

Während der Betriebs- und Wartungsphase wird der tägliche Betrieb der CO<sub>2</sub>-Abscheidungssysteme gesteuert, um sicherzustellen, dass sie mit voller Kapazität laufen und effizient CO<sub>2</sub> absorbieren. Dazu gehören Laststeuerung, Betriebssoftware, Rückführung von CO<sub>2</sub>-armen Lösungsmitteln und regelmäßige Wartung zur Vermeidung von Ausfallzeiten. Auch die Logistik für die Lieferung von komprimiertem CO<sub>2</sub> an langfristige Speicherstätten wie saline Aquifere oder erschöpfte Ölfelder wird übernommen, einschließlich der Handhabung des erforderlichen Equipments zur Injektion.

Beim CO<sub>2</sub>-Transport geht es um die Logistik der Lieferung von komprimiertem CO<sub>2</sub> für die langfristige Speicherung, wozu die Vorbereitung von Pipelinenetzen oder Speicherlösungen vor Ort, abhängig von geeigneten geologischen Formationen gehört.

In der Phase der CO<sub>2</sub>-Speicherung wird durch Bohrungen und die Vorbereitung von Speicherstätten sichergestellt, dass die geologischen Formationen für eine langfristige Speicherung geeignet sind. Dies kann den Anschluss an CO<sub>2</sub>-Pipelinenetze oder die Nutzung von Speicherlösungen vor Ort beinhalten. Im aktuellen Stadium richtet sich die Standortsuche für DAC-Installationen meist nach attraktiven Speicherstätten oder Konnektivität zu entstehenden oder geplanten Hubs. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> kann auch für die Herstellung langlebiger Produkte wie Mineralien, Kunststoffe oder sogar für die Algenzucht verwendet werden, was zur Kreislaufwirtschaft beiträgt (hier nicht im Fokus).

### **+** Vorteile:

- Großes Potenzial an einer Vielzahl von Standorten
- Kann in bestehende industrielle Prozesse integriert werden (z. B. Nutzung von Abwärme)
- Modularität und vergleichsweise geringer Platzbedarf

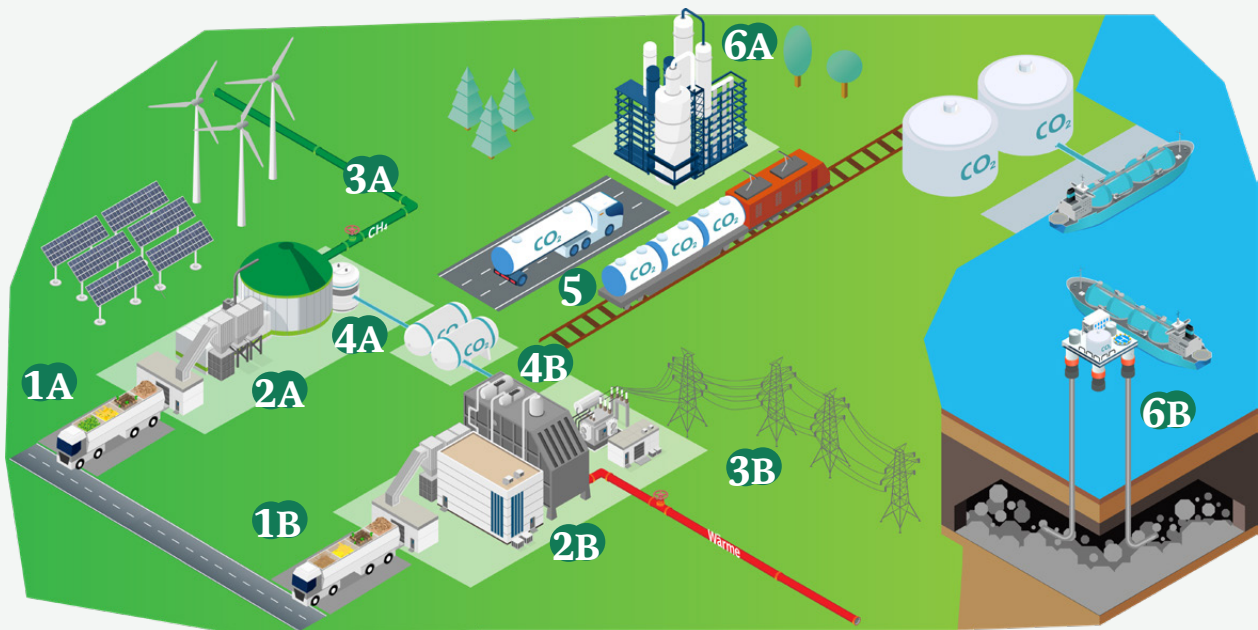
### **+** Zusatznutzen:

- Nutzung von nicht bebaubaren Flächen durch flexible Aufstellung
- Nutzung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> in anderen industriellen Prozessen

### **-** Beschränkungen und Risiken:

- Hoher Wasserverbrauch (nur für flüssige Sorptionsmittel)
- CAPEX-intensiv und sensitiv hinsichtlich „grauer Emissionen“
- Verfügbarkeit von ausreichend (netzgebundenem) Strom aus erneuerbaren Energien gegeben des (aktuell) signifikanten Energiebedarfs
- Begrenzte technologische Bereitschaft, z. B. nicht in größerer Skalierung getestet

## 2.5 Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS)



Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Englisch „Bioenergy with Carbon Capture and Storage“, BECCS) kombiniert eine Vielzahl von Verfahren und kann in verschiedenen Branchen wie Energie, Zement oder Papier eingesetzt werden. In dieser Studie wird zwischen zwei Verfahren unter dem Begriff „BECCS“ unterschieden: (1) Biogasaufbereitung zur Erzeugung von Biomethan unter Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Abgasströmen, nachfolgend als „Biomethan“ bezeichnet, und (2) Umwandlung von Biomasse in Energie (Strom und Wärme) sowohl in Bioenergieanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (BECCS im engeren Sinne) als auch in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (WACCSS). Dieser zweite Weg wird im Folgenden als „BECCS inkl. WACCSS“ bezeichnet. Bei beiden Wegen wird das abgeschiedene CO<sub>2</sub> dauerhaft gespeichert.

### Wichtige Prozessschritte:

1. Transport von Biomasse zum anaeroben Fermenter oder zur Anlage: Anlieferung von Biomasse, z. B. land- oder forstwirtschaftliche Rückstände, Holzabfälle, kommunale Abfälle oder Energiepflanzen<sup>20</sup> zur Verarbeitung.
  - 1 a. Biomethan: Transport von Biomasse zu einem anaeroben Fermenter.
  - 1 b. BECCS einschließlich WACCSS: Transport von Biomasse oder organischen Abfällen zu einer Verwertungsanlage.
2. Erzeugung von Biogas oder Wärme und Strom: Die Biomasse durchläuft je nach Weg unterschiedliche Prozesse.
  - 2 a. Biomethan: Anaerobe Vergärung von Biomasse zur Erzeugung von Biogas und anschließende Aufbereitung zu Biomethan.
  - 2 b. BECCS einschließlich WACCSS: Verbrennung von Biomasse oder Abfall zur Erzeugung von Wärme und Strom.
3. Verteilung: Wärme und Strom werden über bestehende Netze verteilt:

<sup>20</sup> Nicht in Beispielunternehmen eingesetzt, jedoch teilweise in der Industrie verwendet.

- 3 a. Biomethan: Verteilung des erzeugten Biomethans über das Erdgasnetz.
- 3 b. BECCS inkl. WACCS: Verteilung von Strom und Wärme über Strom- und Fernwärmenetze sowie Bereitstellung von Prozesswärme für industrielle Abnehmer.
- 4. Abscheidung und Verflüssigung von CO<sub>2</sub>:
  - 4 a. Biomethan: Abtrennung von CO<sub>2</sub> und Veredelung zur Entfernung von Verunreinigungen. Anschließend erfolgt die Verflüssigung in kleinerem Maßstab für Transport und Lagerung.
  - 4 b. BECCS einschließlich WACCS: Reinigung von CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung (in erster Linie) durch Aminwäsche und andere Technologien zur Entfernung von Verunreinigungen, gefolgt von Verdichtung und Verflüssigung für Transport und Lagerung.
- 5. Transport von CO<sub>2</sub> zur Lagerstätte per Lkw oder Zug: Transport des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> zu einer Anlage oder einem Hafen per Lkw, Zug oder Schiff. Alternativ könnte CO<sub>2</sub> über Pipelines transportiert werden, die z. B. in einen größeren zentralen Speicher-Hub führen.

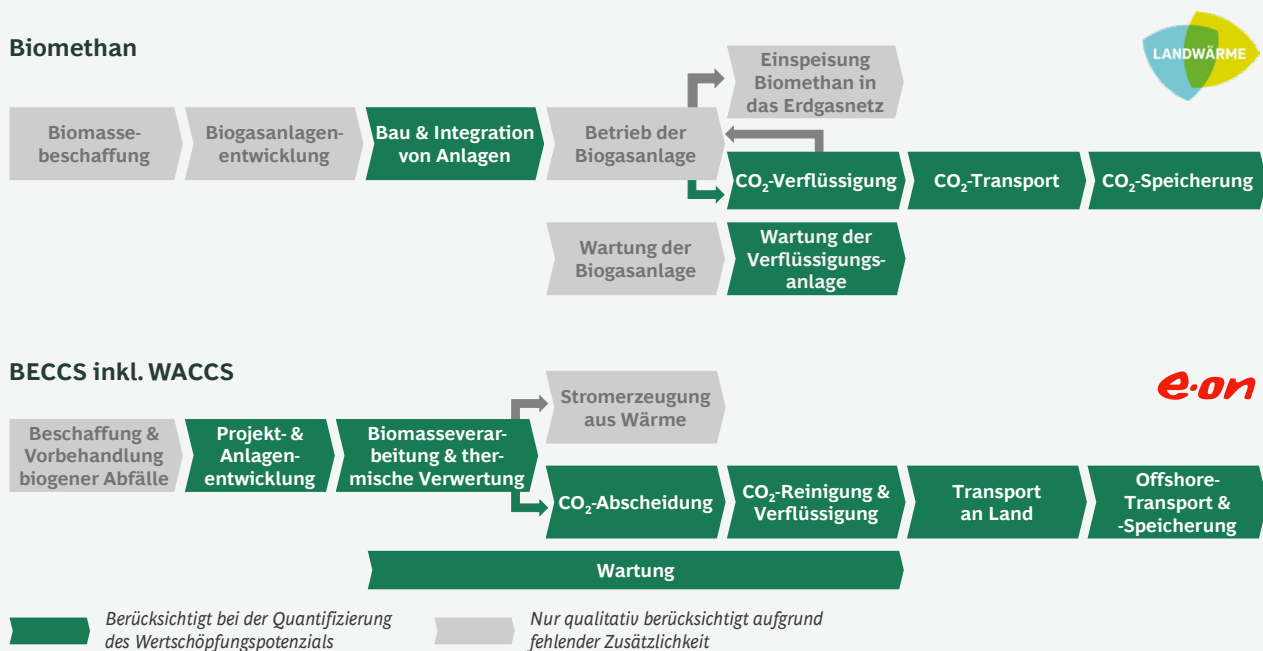
- 6. Verwendung oder Lagerung von CO<sub>2</sub>:
  - 6 a. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird bei der Herstellung von langlebigen Produkten verwendet.
  - 6 b. oder es wird geologisch gespeichert. Es wird in unterirdische geologische Formationen oder in tiefe saline Aquifere und erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten eingepresst und dort gespeichert.

Die Wertschöpfungskette für BECCS beginnt mit der Beschaffung von nachhaltiger Biomasse wie landwirtschaftlichen Reststoffen, Altholz, kommunalen Abfällen oder Energiepflanzen, die dann zur entsprechenden Verarbeitungsanlage transportiert wird.

Bei der Biomethan-Route wird die Biomasse zur Biogaserzeugung in einen Fermenter transportiert. Im täglichen Betrieb wird der Fermentationsprozess gesteuert und das Biogas zu Biomethan aufbereitet. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird dann verflüssigt und für den Transport vorbereitet, was die Integration von Abscheide- und Verflüssigungsanlagen erfordert.

ABBILDUNG 12

### Illustrative Wertschöpfungskette für BECCS



Bei der BECCS- und WACCS-Route wird die Biomasse gesammelt und vorbehandelt, um die Verbrennungseffizienz zu erhöhen und die Emissionen zu verringern. Anschließend wird sie zu einer Anlage transportiert, in der sie bei hohen Temperaturen thermisch verwertet wird und Wärme und Strom erzeugt. Das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> wird durch Aminwäsche aufgefangen und mit Rauchgasreinigungstechnologien für die Speicherung gereinigt. Die überschüssige Wärme aus der Verbrennung wird zur Senkung der Betriebskosten genutzt oder verkauft.

Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird verflüssigt und zu Speicherstätten transportiert, was je nach Standort und Infrastruktur eine multimodale Logistik für den Transport von komprimiertem CO<sub>2</sub> erfordert. Derzeit machen die Transportkosten einen erheblichen Teil der Kosten für die CO<sub>2</sub>-Entnahme mittels BECCS aus. Diese Kosten können drastisch gesenkt werden, wenn eine CO<sub>2</sub>-Pipeline-Infrastruktur aufgebaut, erweitert und für BECCS-Betreiber zugänglich wird.

Neben der dauerhaften On- oder Offshore-Speicherung kann das abgeschiedene CO<sub>2</sub> auch für die Herstellung langlebiger Produkte wie Mineralien, Kunststoffe oder sogar die Algenzucht genutzt werden und so zur Kreislaufwirtschaft beitragen (hier nicht im Fokus).

BECCS verbindet die Bioenergieerzeugung mit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung und trägt so zu negativen Emissionen und erneuerbarer Energieerzeugung bei. Diese Methode ist mit verschiedenen Arten von Biomasse-Rohstoffen kompatibel und bietet ein weltweit großes Potenzial.

### + Vorteile:

- Kompatibel mit verschiedenen Arten von Biomasse-Rohstoffen
- Großes Potenzial an einer Vielzahl von Standorten
- Hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration nach der Abscheidung vom Biomethan

### + Zusatznutzen:

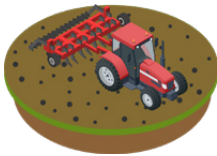
- Unterstützung der Dekarbonisierung des Energiesektors durch die Erzeugung von Bioenergie bei gleichzeitiger Entnahme von CO<sub>2</sub>
- Beseitigung von überschüssigen Ernte-/Biomasserückständen
- Vermeidung von Methanemissionen in die Atmosphäre
- Wiederverwendung von Gärresten als Düngemittel

### - Beschränkungen und Risiken:

- Hoher Wasser- und Energiebedarf
- Hohe Anfangsinvestitionen in die Infrastruktur
- Wettbewerb um Land und Wasser für den Anbau von Rohstoffen (nur für Energiepflanzen)

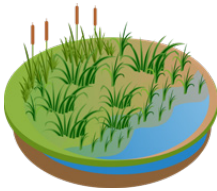
## 2.6 Andere CDR-Methoden, einschließlich ozeanbasierter CDR

Diese Studie analysiert in zusammengefasster Form weitere CDR-Methoden, die über die in den vorangegangenen Unterkapiteln beschriebenen hinausgehen. Dazu gehören weitere landgestützte Methoden wie die Kohlenstoffbindung im Boden, die Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten, das Vergraben von Biomasse und die Injektion von Bio-Öl sowie ozeangestützte Methoden wie die Wiederherstellung von Blue Carbon-Ökosystemen, die Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen, die Ozeandüngung, die direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean und die Versenkung von Biomasse. Diese Methoden wurden nicht einzeln untersucht, da sie derzeit nur in begrenztem Umfang angewandt werden und verlässlichere Daten über ihre Durchführung und Wirksamkeit noch benötigt werden.



### Kohlenstoffbindung im Boden

Diese Methode verbessert die Kohlenstoffspeicherung im Boden durch Praktiken wie Direktsaat, Deckfruchtanbau und organische Materialien. Sie kann die Bodengesundheit erheblich verbessern und die landwirtschaftliche Produktivität steigern. Die Durchführbarkeit dieser Methode wird jedoch durch Probleme mit der Dauerhaftigkeit aufgrund neuer Entwicklungen auf landwirtschaftlichen Flächen, der Umkehrung von Direktsaatverfahren und der Freisetzung von Kohlenstoff im Boden durch die globale Erwärmung in Frage gestellt.



### Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten

Dieser Ansatz beinhaltet die Wiederbefeuchtung degradierter Gebiete durch die Wiederherstellung natürlicher Wasserregime und die Installation von Wasserregulierungsstrukturen, um das Mooswachstum und die anschließende Vegetationsentwicklung zu fördern und so die Kohlenstoffspeicherung, die biologische Vielfalt sowie die Boden- und Wasserqualität zu verbessern. Die hohen Wiederherstellungskosten, mögliche Probleme mit dem Landbesitz und die begrenzte Durchführbarkeit einer langfristigen Überwachung stellen jedoch eine große Herausforderung dar.



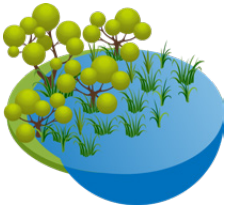
### Vergraben von Biomasse

Das Vergraben von Biomasse bezieht sich auf das Sammeln und Vergraben von organischem Material (z. B. Ernterückstände und Holz) und befindet sich noch im Versuchsstadium. Trotz der geringen Kosten und der Skalierbarkeit sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, z. B. in Bezug auf die potenzielle Zersetzung, wenn die Vergrabungsumgebung nicht angemessen gepflegt wird, logistische Probleme beim Sammeln und Transportieren von Biomasse sowie potenzielle Landnutzungskonflikte oder nachteilige Auswirkungen durch übermäßigen Einsatz. Die Methode wird hinsichtlich ihrer Glaubwürdigkeit diskutiert und unterliegt indirekt verschiedenen Umweltvorschriften wie der Deponierichtlinie oder besonderen Genehmigungsanforderungen.



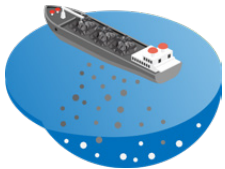
### Bio-Öl-Injektion

Bei diesem Ansatz wird Biomasse durch Pyrolyse in Bio-Öl umgewandelt und in tiefe geologische Formationen injiziert. Dort bietet es eine dauerhafte, groß angelegte Lösung für die Kohlenstoffbindung. Diese Methode befindet sich noch in der Anfangsphase. Sie ist mit hohen Kosten für die Bio-Öl-Produktion und -injektion, technologischen und regulatorischen Hürden und begrenztem Zusatznutzen konfrontiert, was Bedenken hinsichtlich möglicher negativer Umweltauswirkungen weckt.



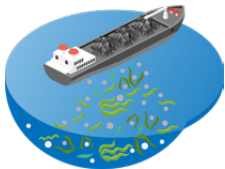
## Wiederherstellung von Blue Carbon-Ökosystemen

Die Wiederherstellung von Blue Carbon-Ökosystemen bezieht sich auf die Wiederherstellung und Erhaltung von Küsten- und Meeresökosystemen wie Mangroven, Seegras und Gezeitensümpfen, die auf natürliche Weise große Mengen an Kohlenstoff binden und speichern. Dies fördert die Artenvielfalt, verbessert die Wasserqualität und schützt vor wetterbedingten Auswirkungen. Die Skalierbarkeit wird jedoch durch Herausforderungen wie Landnutzungskonkurrenz, begrenzte Finanzmittel und begrenzter Umsetzungsmöglichkeiten behindert. Es könnte ein gewisses Potenzial für das Ökosystem-Engineering bestehen, d. h. die Schaffung neuer Ökosysteme mit Küstenvegetation, aber dies könnte sich in relevanter Größenordnung als zu teuer herausstellen.



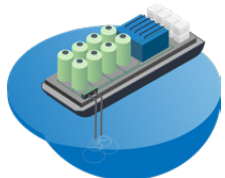
## Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen

Diese Methode kann die Kapazität des Ozeans zur Aufnahme und Speicherung von  $\text{CO}_2$  erhöhen, indem dem Meerwasser alkalische Mineralien zugesetzt werden. Während elektrochemische Ansätze (z. B. Elektrodialyse) mit außerordentlich hohen Kosten verbunden sind, ist es unwahrscheinlich, dass sich mineralische Ansätze wie die Ausbringung von Olivin an Stränden in großem Umfang realisieren lassen. Es gibt keinen bewährten, skalierbaren Ansatz; die Forschung an geeigneten synthetischen Mineralien ist erst im Entstehen begriffen. Weitere Hürden sind logistische Probleme und regulatorische Herausforderungen.



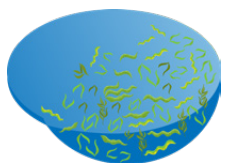
## Ozeandüngung

Die Ozeandüngung umfasst die Hinzugabe von Nährstoffen wie Eisensulfat in den Ozean, um das Wachstum von Phytoplankton anzuregen, das während der Photosynthese  $\text{CO}_2$  absorbiert. Diese Methode ist jedoch mit erheblichen Risiken verbunden, darunter das Risiko einer schädlichen Algenblüte und einer Störung der marinen Ökosysteme. Darüber hinaus erschweren Probleme mit der Regulierung und der Skalierbarkeit sowie die zeitaufwändige und teure Logistik die Umsetzung dieser Methode. Andere Umsetzungsmethoden, wie der künstliche Auftrieb, sind noch nicht in kommerziellem Maßstab erfolgreich und werden wegen negativer Nebenwirkungen kritisch betrachtet.



## Direkte $\text{CO}_2$ -Entnahme aus dem Ozean

Bei diesem Ansatz wird  $\text{CO}_2$  direkt aus dem Meerwasser extrahiert, z. B. durch elektrochemische Verfahren oder membranbasierte Technologien. Trotz des hohen theoretischen  $\text{CO}_2$ -Abscheidungspotenzials aufgrund der hohen volumetrischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Ozean, befindet sich diese Methode derzeit in einem frühen Forschungsstadium. Sie steht vor erheblichen technischen und messtechnischen Herausforderungen, einem hohen Energiebedarf und möglichen ökologischen Auswirkungen. Diese Faktoren erschweren den Einsatz in großem Maßstab.



## Versenken von Biomasse

Bei der Versenkung von Biomasse werden Meeresalgen oder Landpflanzen kultiviert und zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung in der Tiefsee versenkt. Obwohl diese Methode ein erhebliches Klimaschutzpotenzial hat, sind weitere Forschungen zu ihrer Wirksamkeit, Durchführbarkeit und den ökologischen Auswirkungen erforderlich. Außerdem besteht bei terrestrischen Biomasseprojekten die Gefahr, dass sie mit bestehenden Nutzungen konkurrieren oder die Landnutzung verändern.



## 2.7 Messung, Berichterstattung, Verifizierung (MRV) & Intermediäre

Die wirksame Umsetzung und Skalierung von CDR-Methoden erfordert robuste Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) und die Einbeziehung von Intermediären. MRV gewährleistet eine genaue Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Entnahme, Transparenz durch systematische Berichterstattung sowie Zuverlässigkeit durch strenge Verifizierungsprozesse. Zu den Intermediären gehören Makler, Händler, Wiederverkäufer, Börsen, Plattformen und Marktplätze sowie Register. Sie schließen die Lücke zwischen Anbietern und Käufern und sorgen für Transparenz auf dem sich entwickelnden CDR-Zertifikatsmarkt, indem sie Transaktionsabwicklung und Portfoliomanagementdienste anbieten.

Die Wertschöpfungskette für MRV beginnt mit der Messphase. Dazu gehört die Installation von Sensoren und Datenerfassungsgeräten zur Messung der Produktion in verschiedenen relevanten Bereichen. Bei der systematischen und kon-

tinuierlichen Erhebung von Produktionsdaten werden Echtzeit-Messungen und potenziell Fernerkundungstechnologien eingesetzt.

In der Überwachungs- und Berichterstattungsphase werden die Messdaten zusammengestellt und standardisiert, um mittels Datenanalyse die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Menge des gebundenen CO<sub>2</sub> wird anhand anerkannter Methoden berechnet, und die Emissionsdaten werden in standardisierten Berichten zusammengestellt, in denen die Ergebnisse und Methoden der CDR-Projekte detailliert beschrieben werden.

Die Verifizierung beinhaltet eine unabhängige Überprüfung der gemeldeten Daten und Methoden durch Dritte, um die Genauigkeit und die Einhaltung der festgelegten Standards zu gewährleisten.

### ABBILDUNG 13

#### Illustrative Wertschöpfungskette für MRV



*Berücksichtigt bei der Quantifizierung des Wertschöpfungspotenzials*

In der Standard- und Registrierungsphase wird geprüft, ob das Projekt alle einschlägigen Normen und Vorschriften erfüllt. Es werden Zertifizierungen erteilt, und schließlich können CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikate ausgestellt werden.

Die letzte Phase ist die Markttransaktion, bei der Zertifikate an Einzelpersonen oder Unternehmen verkauft werden, die einen Ausgleich für ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen suchen. Hierzu gehört auch das Portfoliomanagement inkl. Berichterstattung über die Kompensationsportfolios gemäß der gesetzlichen und freiwilligen Standards.

## MRV-Prozess und -Reifegrad unterscheiden sich erheblich zwischen den CDR-Methoden

Die MRV-Systeme unterscheiden sich aufgrund der einzigartigen Merkmale der verschiedenen CDR-Methoden erheblich. Für DACCS ist eine präzise, kontinuierliche Überwachung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung erforderlich. Bei BECCS müssen Art und Menge des Biomasseeinsatzes und die CO<sub>2</sub>-Emissionen während des gesamten Prozesses verfolgt werden. MRV ist für beide Methoden vergleichsweise einfach, da die Menge des abgeschiedenen und gespeicherten CO<sub>2</sub> leicht gemessen werden kann. MRV für BCR ist ebenfalls einfach, da es einen ausgereiften Ansatz und etablierte Methoden zur Messung der Stabilität von Biokohle gibt.

Im Gegensatz dazu ist die MRV für ERW sehr komplex, da es keine standardisierte Methodik gibt und umfangreiche Bodenproben erforderlich sind. Naturbasierte Methoden wie Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserte Forstwirtschaft erfordern aufgrund der Variabilität der Ökosysteme eine kontinuierliche Überwachung. Fernerkundung und Felduntersuchungen mit Überwachung einzelner Bäume garantieren maximale Transparenz. Ozeanbasierte CDR-Methoden wie die Alkalinisierung von Ozeanen und Flüssen stehen aufgrund ihres Entwicklungsstadiums und der Komplexität der Meeresumwelt vor erheblichen MRV-Herausforderungen.

## MRV-Fortschritte sind eine entscheidende Voraussetzung für die Skalierung von CDR

Die Verbesserung der MRV-Präzision und -Zuverlässigkeit ist entscheidend für die Transparenz und Berichterstattung auf den Kohlenstoffmärkten. Zu den großen Herausforderungen gehören hohe Kosten, technische Schwierigkeiten bei der zuverlässigen Messung der CO<sub>2</sub>-Entnahme und der Mangel an standardisierten Protokollen, was die Vergleichbarkeit und Skalierbarkeit von CDR-Projekten einschränkt. Die Zukunft von MRV bei CDR ist jedoch vielversprechend, da Fortschritte in der Fernerkundung und der künstlichen Intelligenz die Genauigkeit und Effizienz verbessern. Simulationsgestütztes MRV könnte erhebliche Kostensenkungen ermöglichen, z. B. indem häufige Bodenprobenahmen überflüssig gemacht werden. MRV-Systeme können mit der Entwicklung internationaler Standards robuster werden und so das Vertrauen in CDR-Initiativen und die Investitionen in diese fördern.

## Die Transaktionshürden sind immer noch beträchtlich

Der CDR-Markt birgt mehrere Transaktionshürden. Unklare Regelungen im Zusammenhang mit dem grenzüberschreitenden Handel mit Zertifikaten schaffen Unsicherheit, z. B. aufgrund des Fehlens einer einheitlichen rechtlichen Definition oder der unterschiedlichen Behandlung in den verschiedenen Rechtsordnungen. Der komplexe Transaktionsaufbau, der durch einen Mangel an standardisierten Verträgen noch verschärft wird, trägt ebenfalls dazu bei. Die Bemühungen, das weltweite Angebot an CDR-Zertifikaten zu überblicken und zu verstehen, sind aufgrund des Mangels an harmonisierten Marktkenntnissen und Daten erheblich. Darüber hinaus erschwert die parallele Existenz mehrerer nicht-regulatorischer und regulatorischer Qualitäts-Frameworks die Identifizierung geeigneter Zertifikate für Unternehmensportfolios. Schließlich erschwert die begrenzte Ausstattung der Nachhaltigkeitsteams mit Maßnahmen zur Verwaltung von CDR-Zertifikaten, die häufig auf mehreren Konten gehalten werden, eine effiziente Marktteilnahme.



**Die weltweite CDR-Industrie  
könnte bis 2050 ein jährliches  
wirtschaftliches Potenzial von  
470-940 Milliarden Euro  
erreichen, was so groß ist wie  
die heutige weltweite  
Airline-Industrie.<sup>21</sup>**

<sup>21</sup> 2024 forecast for global passenger and cargo revenues, IATA, 2024.



## 3 CDR kann zu einer globalen 470-940 Mrd. Euro-Industrie werden

### 3.1 Globales wirtschaftliches CDR-Potenzial in 2050 von jährlich 470–940 Mrd. Euro

Das gesamte wirtschaftliche Potenzial von CDR, d. h. die Wertschöpfung (Umsätze), die die Spieler in CDR-bezogenen Sektoren auf der Grundlage der erforderlichen CDR-Mengen erwarten können, hängt entscheidend von der Entwicklung der Kosten für die Erzeugung von CDR-Zertifikaten und der Verteilung dieser Kosten entlang der Wertschöpfungskette ab.

Die Modellierung des CDR-induzierten Wirtschaftspotenzials umfasst einen mehrstufigen Ansatz, in den mehrere Variablen einfließen. Wie in Kapitel

1.3 beschrieben, wurden die CDR-Volumina und die Zusammensetzung des CDR-Portfolios für je vier Szenarien geschätzt. Die CDR-induzierten wirtschaftlichen Potenziale wurden durch Multiplikation der erforderlichen CDR-Volumina mit den jeweiligen CDR-Methodenanteilen und den angenommenen Kosten je Methode abgeleitet. Die wirtschaftlichen Potenziale basieren auf Kostenschätzungen und nicht auf Preisprognosen, um die Ungewissheit von Angebots- und Nachfrageeffekten zu vermeiden und damit die langfristige Projektion zuverlässiger zu machen. Außerdem bilden die Kosten die tat-

sächliche Wertschöpfung besser ab, unabhängig von Übergewinnen. Das wirtschaftliche Potenzial wird für ein ausgewogenes CDR-Portfolio im 2°C- und 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad modelliert (d. h. 4,5 bzw. 9 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr im Jahr 2050).

Die Systemgrenzen, die bei der Berechnung der wirtschaftlichen Potenziale durch die jeweilige CDR-Methode angewandt werden, umfassen alle Schritte der Wertschöpfungskette, die direkt an der Erstellung und Vermarktung eines Zertifikats beteiligt sind. Dies umfasst die Lieferumfänge und Inputs, MRV und die intermediären Dienstleistungen, die Markttransaktionen ermöglichen. Die Wertschöpfungskette wird bis zu dem Punkt modelliert, an dem eine bestimmte Menge an CO<sub>2</sub> langfristig gespeichert oder in einem langlebigen Produkt verwendet wird. Es wird nur das durch CDR induzierte wirtschaftliche Potenzial berücksichtigt, um eine Doppelzählung zu vermeiden. So werden beispielsweise die Rohstoffe für BECCS nicht berücksichtigt, da sie unabhängig von der CO<sub>2</sub>-Entnahme für die Energieerzeugung benötigt werden. Die gesamte Infrastruktur, die die CO<sub>2</sub>-Entnahme ermöglicht, wie z. B. die Infrastruktur für den CO<sub>2</sub>-Transport und die Lieferung von Anlagenkomponenten, wird jedoch berücksichtigt. Zusatznutzen für andere Industrien, wie erhöhte landwirtschaftliche Erträge durch Biokohle oder beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung, werden nicht quantifiziert.

Im folgenden Abschnitt wird die angenommene Kostenentwicklung in der ausgewogenen Portfoliozusammensetzung erläutert, bevor auf die CDR-induzierten wirtschaftlichen Potenziale eingegangen wird.

Für die meisten CDR-Methoden sind bis 2050 erhebliche Kostensenkungen von 35–85 % zu erwarten

Die aktuelle Kostenbasis für CDR-Methoden wurde aus Studien und Gesprächen mit Stakeholdern innerhalb des CDR-Ökosystems abgeleitet. Für jede CDR-Lösung wurden die wichtigsten Faktoren ermittelt, die die künftigen Kosten beeinflussen, und es wurden Annahmen über ihre Entwicklung im Laufe der Zeit getroffen. Diese zukünftigen Kostenprognosen wurden mit den Schätzungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zu Kostenpotenzialen und zahlreichen Studien abgeglichen. In Anbetracht der erheblichen Ungewissheit bei den künftigen Kosten spiegelt sich

diese Variabilität in den in Abbildung 14 dargestellten Kostenspannen für 2050 wider. Auch die aktuelle Kostenbasis kann je nach Prozesstechnologie, Standort und anderen Faktoren erheblich variieren.

Bis 2050 werden beschleunigte natürliche Prozesse und technologiebasierte CO<sub>2</sub>-Entnahme voraussichtlich zu erheblichen Kostensenkungen führen. Diese Kostensenkungen sind vor allem bei Prozessen zu erwarten, die in hohem Maße auf Anlagentechnik und -ausrüstung angewiesen sind und bei denen Skaleneffekte und Erfahrungswerte einen erheblichen Einfluss auf die Kostensenkung haben. Kostensenkungen könnten auch bei Betrieb und Wartung erzielt werden, aber es werden konstantere (und teilweise schwankende) Kosten für Energie, Rohstoffe und andere Inputs erwartet. Bei Verfahren, die mit Landnutzungskonkurrenz oder anderen natürlichen Beschränkungen konfrontiert sind, könnte es sogar zu Kostensteigerungen kommen, z. B. für Genehmigungen.

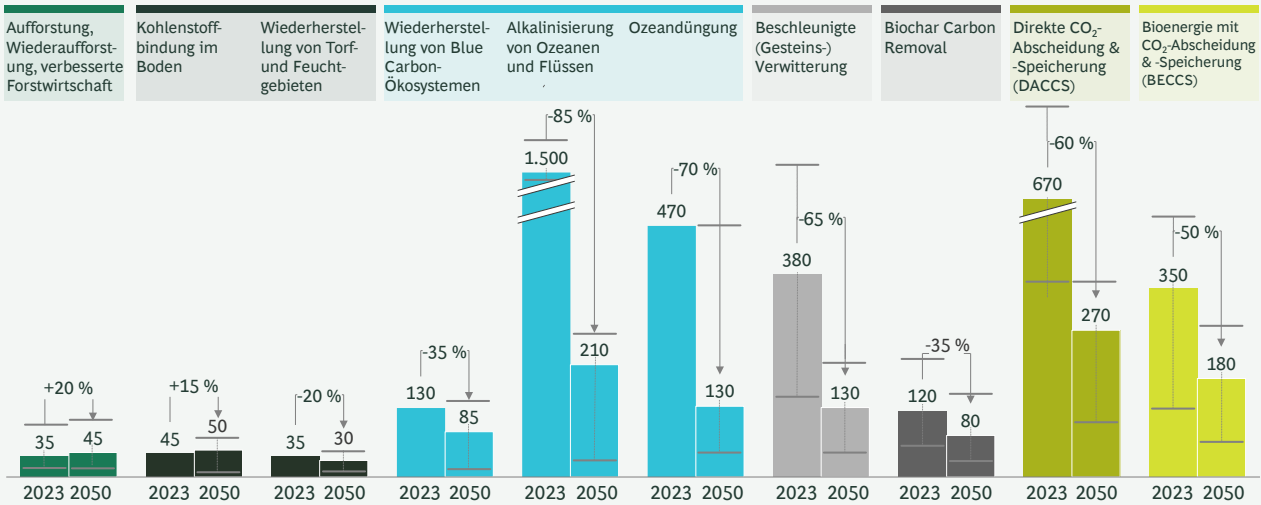
Bei Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) könnten die Kosten um etwa 50 % sinken, was auf Skaleneffekte und den Ausbau der Transport- und Speicherinfrastruktur zurückzuführen wäre, die die durchschnittlichen Kosten pro transportierter Tonne CO<sub>2</sub> senken können. Die Kosten hängen auch stark von der Menge des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> ab: Die Kosten pro abgeschiedener Tonne sinken mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration im Ausgangsmaterial. Daher haben Biogasaufbereitungsanlagen in der Regel niedrigere spezifische Kosten pro Tonne als WACCs-Anlagen.

Auf der Grundlage von Skaleneffekten und typischen Erfahrungswerten könnte die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung aus der Luft (DACCS) eine noch höhere Kostenreduzierung von 60 % erzielen. DACCS würde ebenfalls von Verbesserungen der Speicherinfrastruktur profitieren. Die Kostenpanne pro entnommener Tonne CO<sub>2</sub> ist bei DACCS ähnlich groß wie bei BECCS und hängt stark von der Abscheidungsmethode ab. Betreiber verwenden in der Regel ein flüssiges Sorptionsmittel oder einen Feststoffsorbenten, obwohl es auch andere DACCS-Verfahrensvarianten gibt. Darüber hinaus hängen die Kosten für die Abscheidung stark vom Energiebedarf, der durch den Regenerationsmechanismus bestimmt wird, und letztlich von den standortspezifischen Energiekosten ab.

## ABBILDUNG 14

### Erwartete CDR-Kostenentwicklung bis 2050<sup>1</sup> (€ pro Tonne CO<sub>2</sub>)

Global Ausgewogenes Portfolio



#### Zentrale Annahmen zur Kostenentwicklung

Steigende Lohnkosten, abnehmende Landverfügbarkeit, höhere MRV-Qualitätsanforderungen, steigende Inputpreise (z.B. für Biomasse, Dünger)

Natürliche Begrenzungen und zunehmender Landnutzungs-wettbewerb

Kosten für Inputmaterialien für Torfdämme, Kunststoffpfähle usw. sinken durch Skaleneffekte

MRV-Fortschritte durch Innovation und standardisierte Methodik ermöglicht

Beschaffungs- und Verteilungskosten sinken mit Skalierung, Überwindung rechtlicher Hürden

Quantifizierung und Überwachung vereinfacht, Kosten der Verteilung sinken durch Skaleneffekte

Kosten für MRV-Proben sinken durch Skaleneffekte

Anlagenkapazitäten steigen und die Rohstoffpreise bleiben größtenteils stabil

Basierend auf typischen Erfahrungskurven und Untersuchungen der ETH Zürich

Anlagenkapazitäten steigen und Transport- und Speicherinfrastruktur wird ausgebaut

Minimal- und Maximalwerte für 2023 und 2050

1. Kosten für direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean aufgrund unzureichender Daten nicht modelliert  
Anmerkung: Zahlen gerundet; Quelle: IPCC AR6 WGIII Chapter 12; IVL 2023; ETH 2024; Experteninterviews

Auch bei der beschleunigten (Gesteins-)Verwitterung (ERW) könnte eine Kostensenkung von etwa 65 % erreicht werden. Die tatsächliche Kostensenkung hängt vor allem von den Entwicklungen im Bereich Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) ab. Eine standardisierte Methodik, Laborproben in größerem Maßstab und sensor- oder simulationsgestützte Überwachungsverfahren könnten zu erheblichen Kostensenkungen führen.

Auch bei Biochar Carbon Removal (BCR) könnten die Kosten um bis zu 35 % gesenkt werden. BCR ist bereits heute technisch ausgereift, könnte aber noch von Skalen- und Erfahrungseffekten profitieren, wenn der Pyrolyseprozess weiter verbessert wird. Die Industrialisierung der Produktion könnte die Stückkosten für die Pyrolysemaschinen weiter senken.

Obwohl sie sich noch im Anfangsstadium befindet, könnte ozeanbasierte CO<sub>2</sub>-Entnahme auch erheblich von Kostensenkungen zwischen 35 % und 85 % profitieren. Ein solcher Rückgang könnte erreicht werden, wenn die Kosten für Inputs oder z. B. die Ausbringung von Mineralien mit zunehmender

der Skalierung sinken und wenn die vorherrschenden MRV-Probleme gelöst werden können. Dies ist jedoch noch sehr ungewiss.

Umgekehrt könnten die Kosten für naturbasierte Entnahmemethoden wie Aufforstung, Wiederaufforstung, verbesserte Forstwirtschaft und Kohlenstoffbindung im Boden um 20 % bzw. 15 % steigen. Steigende Inputpreise, Arbeitskosten und Landnutzungs-konkurrenz würden diese potenziellen Steigerungen in erster Linie verursachen. Ein stärkerer Fokus auf genaue Überwachung und Qualitätssicherung könnte die Kosten weiter in die Höhe treiben.

Die Kosten für naturbasierte Entnahme, insb. aus forstwirtschaftlichen Projekten, können bereits heute erheblich variieren und reichen von unter 10 EUR bis zu 100 EUR oder mehr. Die Kosten hängen stark von der Auswahl der Setzlinge, den länderspezifischen Arbeitskosten sowie der Qualität und Intensität der Überwachung ab. Der Verified Carbon Standard (VCS), der größte Zertifizierer von freiwilligen CO<sub>2</sub>-Kompensationen, hat vor kurzem eine neue Methodik veröffentlicht, die

Monokulturprojekte verbietet. In Verbindung mit strengeren Überwachungsanforderungen, wie z. B. der Überwachung von einzelnen Bäumen, könnten bei Premium-Projekten Kosten von bis zu 100 EUR anfallen, im Durchschnitt müssen sie jedoch viel niedriger sein, um die erforderliche Größenordnung erreichen zu können. Das „ausgewogene Portfolio“ geht von durchschnittlichen Kosten in Höhe von 45 EUR pro Tonne CO<sub>2</sub>-Entnahme im Jahr 2050 aus.

Die erwarteten Kostensenkungen für die meisten Methoden sind entscheidend, um CDR-Technologien praktikabler und skalierbar zu machen, so dass sie eine wichtige Rolle bei den globalen Dekarbonisierungsbemühungen spielen können. Wie bereits erwähnt, bestehen jedoch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Kostenpotenziale. Vieles hängt von den realisierten Skalen- und Erfahrungskurven, der Stabilität der Inputpreise und den Fortschritten im MRV-Bereich ab.

Das weltweite wirtschaftliche Potenzial von CDR könnte bis zu 940 Milliarden Euro erreichen

Das weltweite CDR-induzierte Wirtschaftspotenzial könnte in Szenarien, die mit einem Temperatur-

anstieg von unter 2°C bzw. 1,5°C vereinbar sind, rasch ansteigen und 2050 jeweils 470–940 Mrd. EUR erreichen. Die prognostizierten wirtschaftlichen Potenziale für CDR veranschaulichen unterschiedliche Ambitionsniveaus und technologischen Fortschritt bei den Dekarbonisierungsbemühungen, stellen aber keine fixe Obergrenze dar.

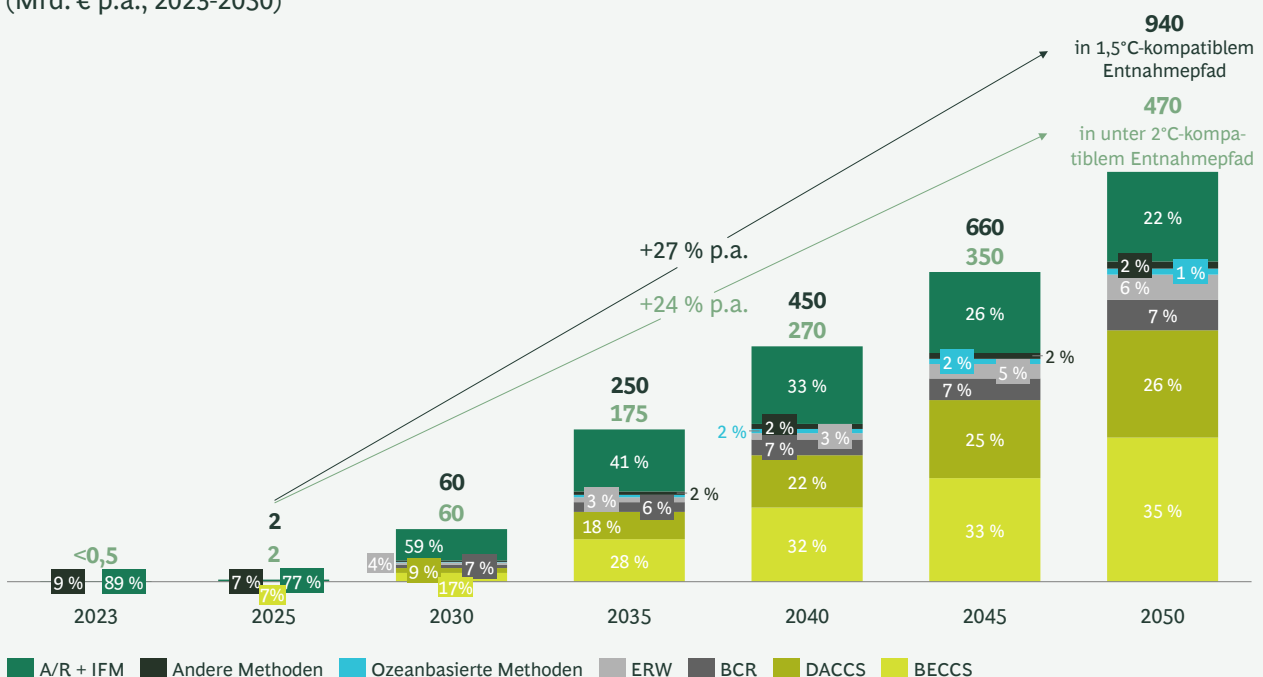
Wie in Abbildung 15 dargestellt, könnte das wirtschaftliche Potenzial bis 2030 erheblich wachsen und in beiden Szenarien 60 Mrd. EUR pro Jahr erreichen. Nach 2030 könnte sich das Wachstum weiter beschleunigen, angetrieben durch Kostensenkungen bei CDR-Methoden und verstärkte Verpflichtungen zur Dekarbonisierung. Im Rahmen der Szenarien, die mit einer Erwärmung von weniger als 2°C und 1,5°C vereinbar sind, könnte das wirtschaftliche Potenzial bis 2035 175–250 Mrd. EUR pro Jahr und bis 2040 270–450 Mrd. EUR pro Jahr erreichen. In diesem Zeitraum könnten technologische Verfahren wie DACCS und BECCS an Momentum gewinnen und skalieren, die zusammen einen erheblichen Teil des CDR-induzierten Wirtschaftspotenzials ausmachen könnten.

## ABBILDUNG 15

### CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial nach Methode

(Mrd. € p.a., 2023-2050)

Global Ausgewogenes Portfolio



Anmerkung: Zahlen gerundet; Anteile <1 % zur besseren Lesbarkeit nicht angezeigt

Quelle: IPCC AR6 WGIII Chapter 12; Climate Focus, Voluntary Carbon Market 2023 Review; 2024 State of Voluntary Carbon Market Report; BCG CDR Marktmodell

Nach 2040 könnte das wirtschaftliche Potenzial von CDR weiter wachsen und bis 2050 schließlich 470-940 Mrd. EUR pro Jahr erreichen. In einem reifen Markt, in dem das anfängliche exponentielle Wachstum mit zunehmender Etablierung der CDR-Technologien in ein stetiges, nachhaltiges Wachstum übergeht, wäre eine leicht rückläufige durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) zu erwarten. Ein breiter gefächertes Portfolio von CDR-Methoden, einschließlich ERW und BCR, könnte zu einem anhaltenden Wachstum bis zur Mitte des Jahrhunderts und darüber hinaus beitragen. Vor allem BECCS und DACCS dürften mit 35 % bzw. 26 % des wirtschaftlichen Potenzials bis 2050 auf der Grundlage eines ausgewogenen Portfolios einen erheblichen Beitrag leisten.

Das erforderliche Wachstum für unter 2°C- und 1,5°C-kompatible Entnahmepfade entspricht den historischen Trends beim Wachstum der Photovoltaik und der Windenergie, wenn man von ähnlichen Einführungsrate und technologischen Fortschritten ausgeht. Die Entwicklung des gesamten CDR-Methodenportfolios ist entscheidend für das Erreichen dieser Prognosen und erfordert eine erhebliche Kostendegression und Skalierung.

## 3.2 Unterschiede im wirtschaftlichen Potenzial je nach CDR-Methode

Das CDR-induzierte Wirtschaftspotenzial wird entlang von 6 Wertschöpfungsstufen aggregiert

Das wirtschaftliche Potenzial jeder CDR-Methode wird im Laufe der Zeit auf sechs Stufen der Wertschöpfungskette aufgeteilt. Diese Schritte umfassen:

- **Anlagentechnik und -ausrüstung**, d. h. Anbieter von Technologien und Fähigkeiten, die für die Planung und den Bau von Anlagen erforderlich sind, z. B. Komponentenhersteller und Ingenieurdienstleister;
- **Rohstoffe und andere Betriebsmittel**, einschließlich Anbieter von wichtigen Materialien wie Dünger, Setzlinge und Gesteinsmehl;
- **Betrieb und Instandhaltung**, d. h. Dienstleistungen, die für den kontinuierlichen Betrieb und die Instandhaltung erforderlich sind, einschließlich Standort- und Projektentwicklung und Energieversorgung durch Versorgungsunternehmen;
- **CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung**, einschließlich der Anbieter von Infrastrukturen für den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub>, wie Bahn- und Lkw-Betreiber und Offshore-Speicher;

- **MRV**, d. h. Organisationen, die die CO<sub>2</sub>-Entnahme messen, berichten und verifizieren, wie z. B. Großlabore, Softwareanbieter und Prüfer;
- **Intermediäre**, die Markttransaktionen und den Zertifikatehandel ermöglichen und durchführen, also Makler, Händler, Wiederverkäufer, Börsen, Plattformen und Marktplätze sowie Registerstellen.

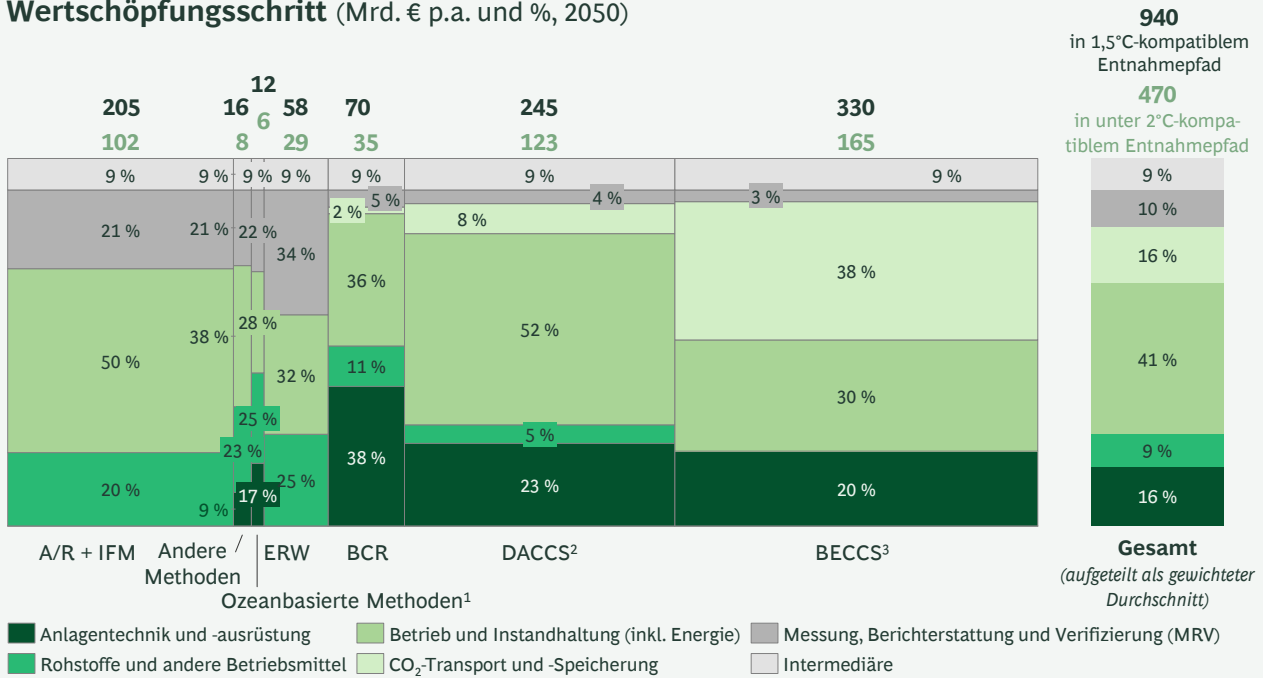
Während Anlagentechnik und -ausrüstung sowie CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung hauptsächlich durch CAPEX getrieben werden, sind die anderen Schritte der Wertschöpfungskette ausschließlich oder zumindest hauptsächlich durch OPEX getrieben. Die Aufschlüsselung des wirtschaftlichen Potenzials basiert auf illustrativen Wertschöpfungsketten und kann sich je nach spezifischer Anlagenkonfiguration oder Standort unterscheiden.

Um das wirtschaftliche Potenzial zu bewerten, werden die Wertpools für jeden Schritt der Wertschöpfungskette entsprechend den modellierten Volumina für jede CDR-Methode zusammengefasst. Diese Methode der Aufschlüsselung des wirtschaftlichen Potenzials ermöglicht es, die individuellen wirtschaftlichen Beiträge jeder CDR-Methode zu ermitteln und die spezifischen Rollen von Ausrüstungslieferanten, EPC-Firmen, Rohstoff- und Betriebsmittellieferanten, Wartungsdienstleistern und anderen wichtigen Akteuren hervorzuheben.



ABBILDUNG 16

**CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial nach Methode und Wertschöpfungsschritt** (Mrd. € p.a. und %, 2050) Global Ausgewogenes Portfolio



1. Kosten für direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus dem Ozean aufgrund unzureichender Daten nicht modelliert 2. DACCS-Unterkategorien gleich gewichtet 3. BECCS-Biomethan mit 20% gewichtet, andere BECCS (inkl. WACCS) mit 80% gewichtet  
 Anmerkung: Zahlen gerundet; Nur zusätzliches CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial in der Modellierung enthalten  
 Quelle: BCG CDR Marktmodell

Das wirtschaftliche Potenzial entlang der Wertschöpfungskette ist je nach CDR-Methode sehr unterschiedlich

Das wirtschaftliche Potenzial entlang der CDR-Wertschöpfungskette ist bei den verschiedenen Methoden sehr unterschiedlich. Abbildung 16 zeigt den Anteil des wirtschaftlichen Potenzials nach Wertschöpfungsschritten im Jahr 2050 und verdeutlicht die individuellen wirtschaftlichen Beiträge jeder CDR-Methode. Die Breite jeder Spalte zeigt dabei das globale wirtschaftliche Potenzial jeder CDR-Methode in Milliarden Euro in den Entnahmepfaden, die mit unter 2°C und 1,5°C kompatibel sind.

Das größte Potenzial für Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserte Forstwirtschaft liegt in den Bereichen Betrieb und Pflege, die durch den Arbeitsaufwand für die Standortvorbereitung, die Anpflanzung und die Pflegeaktivitäten bedingt sind. Darüber hinaus tragen steigende Düngemittelkosten aufgrund der erhöhten Nachfrage und der Beschränkung auf natürliche Düngemittel zu dem

hohen Anteil an Rohstoffkosten bei. MRV spielt aufgrund der Notwendigkeit einer kontinuierlichen und präzisen Überwachung eine entscheidende Rolle und ist besonders wichtig bei Premiumprojekten mit Einzelbaumüberwachung. In Anbetracht des zunehmenden Drucks von Umweltorganisationen und der Verschärfung der regulatorischen Anforderungen könnte die Nachfrage nach Premium-Projekten in Zukunft ein stärkeres Wachstum erfahren. Dies ist jedoch noch sehr ungewiss.

ERW weist ein einzigartiges Profil mit einem erheblichen Anteil an MRV auf, da für die Überprüfung umfangreiche Bodenproben und Laboranalysen erforderlich sind. Bis 2050 könnten die MRV-Kosten deutlich sinken, was vor allem auf die wachsende globale Anwendung, die erwartete Entwicklung eines standardisierten MRV-Protokolls und den potenziellen Einsatz simulationsbasierter MRV-Methoden zurückzuführen ist. Da die Gesamtkosten für die CO<sub>2</sub>-Entnahme mittels ERW im Laufe der Zeit sinken, könnten die Kosten für Betrieb und Wartung sowie für Ausgangsmaterial und andere Inputs einen größeren Anteil am wirtschaftlichen Potenzial haben. Dazu gehören die Kosten für Gesteinsbeschaffung, Zerkleinerung, Transport und

Ausbringung, die mit zunehmender Skalierung sinken dürften, wenn auch in geringerem Maße als die MRV-Kosten.

BCR ist durch hohe Anteile von Anlagentechnik und -ausrüstung sowie Betrieb und Instandhaltung gekennzeichnet. Während die Kosten für Anlagentechnik und -ausrüstung mit zunehmender Anlagenkapazität und -größe sinken könnten, könnten die Rohstoffpreise insbesondere in Europa moderat steigen. Ein kleiner Teil des wirtschaftlichen Potenzials wird dem CO<sub>2</sub>-Transport und der Speicherung zugewiesen. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Potenzial nicht direkt mit dem Transport- und Speicherpotenzial für DACCS und BECCS vergleichbar ist. Bei BCR bezieht sich dies vielmehr auf die Kosten für die Vermarktung der Biokohle und den Transport zum Endverbraucher (z. B. Landwirte oder Bauunternehmen).

DACCS ist in den Jahren 2030 und 2050 durch erhebliche Beiträge von Betrieb und Instandhaltung sowie von Anlagentechnik und -ausrüstung gekennzeichnet. Darin spiegeln sich insbesondere der Energieverbrauch und der Bedarf an fortschrittlicher Technologie wider, der mit dieser Methode verbunden ist. Im Laufe der Zeit nimmt der Anteil der Anlagentechnik und -ausrüstung ab, was auf typische Erfahrungskurven und Fortschritte in der Forschung, z. B. hinsichtlich Abscheidungseffizienz, zurückzuführen ist.

BECCS weist ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial bei Betrieb und Instandhaltung sowie bei der Anlagentechnik und -ausrüstung auf. Dies verdeutlicht den umfassenden Infrastruktur- und Wartungsbedarf von BECCS. Der Anteil der CO<sub>2</sub>-Transport- und -Speicherkosten könnte im Laufe der Zeit deutlich sinken, was sowohl auf Skaleneffekte als auch auf Infrastrukturinvestitionen zurückzuführen wäre. Die Rohstoff- bzw. Inputkosten werden nicht berücksichtigt, um eine Doppelzählung des wirtschaftlichen Potenzials zu vermeiden: Der Rohstoff ist für Bioenergieanlagen unabhängig von der CO<sub>2</sub>-Entnahme nach der Verbrennung erforderlich. Daher gibt es kein (oder nur ein minimales) zusätzliches wirtschaftliches Potenzial für die Beschaffung von Rohstoffen, das direkt durch CDR entsteht.

Insgesamt entfällt 2050 der größte Anteil auf Betrieb und Wartung, z. B. aufgrund des erheblichen Energiebedarfs. Auf Anlagentechnik und -ausrüstung sowie Rohstoffe und andere Inputs entfallen ebenfalls erhebliche Anteile, was die wesentliche Rolle von Infrastruktur, Maschinen, technischen Komponenten und Rohstoffen in den verschiedenen

CDR-Prozessen verdeutlicht. MRV und Intermediäre könnten bis zu 20 % des wirtschaftlichen Potenzials ausmachen, was die Notwendigkeit der Einhaltung von Vorschriften, der genauen Messung der CO<sub>2</sub>-Entnahme, der Transparenz und der effizienten Durchführung von Markttransaktionen unterstreicht.

Technologielieferanten könnten durch CDR ein massives Wachstum verzeichnen - vor allem durch beschleunigte natürliche Prozesse und technologiebasierte Entnahme

Während für deutsche und europäische Akteure Potenziale über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg bestehen könnten, ist das wirtschaftliche Potenzial der Anlagentechnik und -ausrüstung angesichts der historischen Stärke Europas und Deutschlands in diesem Sektor besonders relevant. Nachdem in diesem Abschnitt die globalen Potenziale im Bereich Anlagentechnik und -ausrüstung erläutert wurden, werden im nächsten Kapitel die Potenziale für Deutschland und Europa detailliert dargestellt.

Das wirtschaftliche Potenzial für CDR-bezogene Anlagentechnik und -ausrüstung könnte ein erhebliches Wachstum erfahren, mit einem geschätzten jährlichen Anstieg von 15–19 % von 2030 bis 2050 unter 2°C- bzw. 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfaden. Dieser Wachstumspfad ist in Abbildung 17 dargestellt, die die Ausweitung des wirtschaftlichen Potenzials in beiden Szenarien von 5 Mrd. EUR im Jahr 2030 auf 76–152 Mrd. EUR im Jahr 2050 zeigt. Neben BCR könnten technologiebasierte Entnahmefethoden wie DACCS und BECCS wesentlich zu diesem Wachstum beitragen.

Die hohe technologische Skalierbarkeit von BCR könnte das wirtschaftliche Potenzial von Anlagen und Technologien in den nächsten Jahren erheblich steigern. Bis 2030 könnte BCR 32 % des wirtschaftlichen Potenzials ausmachen, die restlichen zwei Drittel entfallen auf DACCS, BECCS und andere Methoden. In den folgenden Jahrzehnten dürften DACCS und BECCS einen größeren Anteil am wirtschaftlichen Potenzial einnehmen, da sie sich im Referenzportfolio schneller verbreiten. Bis 2050 könnten DACCS und BECCS 36 % bzw. 44 % des wirtschaftlichen Potenzials bei Anlagentechnik und Ausrüstung ausmachen, während BCR in einem ausgewogenen CDR-Portfolio 17 % ausmachen könnte.

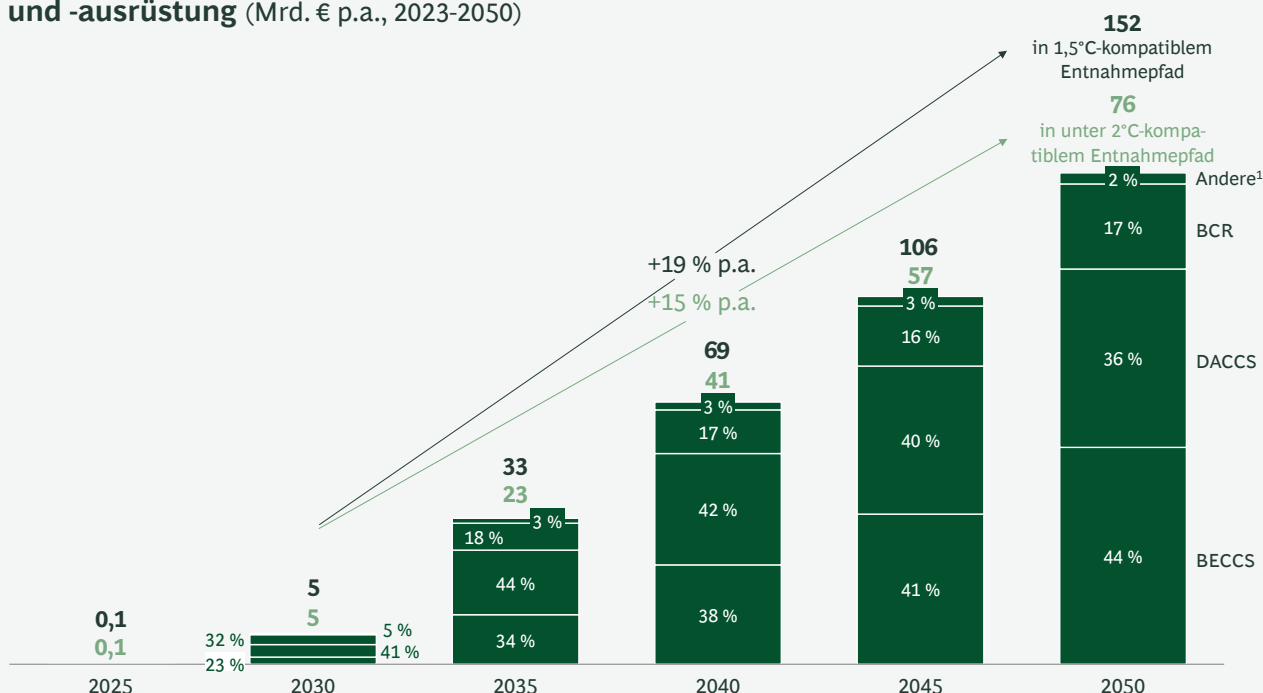
Während alle technologiebasierten CDR-Methoden irgendeine Form von Messgeräten (z. B. Temperatur, Druck, Durchfluss) und Prozesssteuerungssystemen (z. B. speicherprogrammierbare Steuerungen oder kleine dezentrale Steuerungssysteme) erfordern, unterscheiden sich die Schlüsselkomponenten zwischen Methoden wie DACCS, BECCS und BCR. DACCS erfordert neben anderen Komponenten je nach Konfiguration Hochtemperatur-Wärmepumpen, Vakuumpumpen oder elektrochemische Zellstapel. BECCS (Biomethan oder BECCS inkl. WACCS) erfordert eine Rauchgasaufbereitungsanlage, ein kryogenes Kühlsystem, Gaskompressoren und andere kritische Komponenten, je nach spezifischer Konfiguration. BCR erfordert weniger kritische Komponenten, ist aber z. B. auf hochwertige Legierungen angewiesen. Die ständige Versorgung mit diesen Komponenten und Materialien in hervorragender Qualität und zu wettbewerbsfähigen Kosten ist eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente und kostengünstige CO<sub>2</sub>-Entnahme.

Für Technologielieferanten ist dies eine große Chance, in den kommenden Jahren Innovationen zu entwickeln und die Skalierung der weltweiten CDR-Projekte und -Installationen zu unterstützen. Die Nachfrage nach fortschrittlichen, innovativen Anlagen und Technologien zur Optimierung und Skalierung von CDR-Methoden könnte das Wirtschaftswachstum und die Schaffung von Arbeitsplätzen in diesem Sektor vorantreiben. Die verstärkte Einführung solcher Technologien ist für die Erreichung der globalen Dekarbonisierungsziele von entscheidender Bedeutung, so dass die Anbieter von Anlagentechnik und -ausrüstung eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der Klimaziele spielen können.

Europäische Anbieter könnten in diesem sich entwickelnden Markt eine wichtige Rolle spielen, da sie in Sektoren wie dem Maschinenbau und der Komponentenherstellung erhebliche Investitionen tätigen und in der Vergangenheit bereits ihre Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis gestellt haben. In Kapitel 4 werden das wirtschaftliche Potenzial für deutsche und europäische Zulieferer und seine Auswirkungen auf das Beschäftigungspotenzial näher untersucht.

ABBILDUNG 17

**CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial in Anlagentechnik und -ausrüstung** (Mrd. € p.a., 2023-2050) Global Ausgewogenes Portfolio



1. Andere Methoden beinhalten beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung, Kohlenstoffbindung im Boden, Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten und ozeanbasierte Methoden  
Anmerkung: Zahlen gerundet; Quelle: BCG CDR Marktmodell

**Die flächendeckende Einführung von CDR kann in Deutschland zu einem Beschäftigungspotenzial von bis zu 190.000 Arbeitsplätzen in beitragenden Sektoren führen und damit die derzeitige Beschäftigung in der Windenergie-Branche übertreffen.**





## 4 Europa und Deutschland können CDR-Wertschöpfungsketten gestalten

### 4.1 Eine 110-220 Mrd. Euro-Chance für Europa und Deutschland

Der Wettbewerbsvorteil Europas und Deutschlands liegt vor allem in der Technologie

Angesichts des enormen wirtschaftlichen Potenzials, das durch CDR entstehen kann, stellt sich die Frage, wie sich dieses weltweit auf Regionen und Länder verteilen wird. Wettbewerbsvorteile spielen hier eine entscheidende Rolle. Die eigentlichen CDR-Projekte bzw. -Installationen werden in Gebieten mit

den relevanten natürlichen Bedingungen (z. B. verfügbarem Land) und den niedrigsten Betriebs- und Wartungskosten (z. B. Energie- und Lohnkosten) erfolgen. Die Technologie für diese Anlagen und die Software, die für die Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Entnahme und die Vermarktung der daraus resultierenden Zertifikate entwickelt wird, können jedoch von überall auf der Welt kommen.

Der Wettbewerbsvorteil Europas und Deutschlands beruht auf seiner technologischen Leistungsfähigkeit. Deutschland ist der drittgrößte Maschinenhersteller der Welt, und der deutsche Maschinen- und Anlagenbau gilt als führende Export- und Innovationsbranche.<sup>22</sup> Auch Software und Finanzdienstleistungen sind für die europäische Wirtschaft von großer Bedeutung. Aufgrund der (derzeit) hohen Strompreise in Deutschland ist es jedoch ungewiss, ob hier ein signifikanter Anteil an DACCS- oder BECCS-Anlagen (mit Ausnahme von Biomethan) errichtet werden wird, auch wenn jüngste Studien auf das Potenzial hinweisen.<sup>23</sup> Angesichts der begrenzten Fläche und Küstenlinie Deutschlands ist es auch unwahrscheinlich, dass es viele Aufforstungs- oder ozeanbasierte Projekte geben wird. BCR könnte eine Ausnahme sein, da hier überschüssige thermische und elektrische Energie erzeugt wird und höhere Energiepreise die wirtschaftliche Rentabilität solcher Anlagen erhöhen.

In Europa gibt es ähnliche räumliche Beschränkungen, was bedeutet, dass der Großteil der Anlagen und Projekte wahrscheinlich in Regionen mit mehr verfügbarem Land angesiedelt werden könnte, wie z. B. im globalen Süden. Daher liegt das größte Potenzial für Europa und Deutschland in der Lieferung von Komponenten und technischen Dienstleistungen sowie in der Bereitstellung von weiteren standortunabhängigen Dienstleistungen, die für die CO<sub>2</sub>-Entnahme erforderlich sind.

Das wirtschaftliche Potenzial für Europa und Deutschland wird in einem dreistufigen Verfahren bewertet:

- 1. Wettbewerbsvorteil:** Für jede CDR-Methode und jeden Schritt der Wertschöpfungskette wurde der entscheidende Faktor für den Wettbewerbsvorteil ermittelt. Dieser Faktor könnte entweder die Technologieführerschaft oder die Verfügbarkeit von Ressourcen, wie Fläche oder günstiger, „grüner“ Energie, sein.
- 2. Vergleichbare Branchen:** Für die Technologieführerschaft wurden geeignete Vergleichsindustrien ermittelt, und für die Ressourcenverfügbarkeit wurden geeignete Proxies bestimmt.

- 3. Marktanteile:** Es wurden die Anteile des führenden Landes in der vergleichbaren Branche analysiert. Darüber hinaus wurden die derzeitigen Anteile der EU-27 und Deutschlands untersucht, um ihr realistisches wirtschaftliches Potenzial abzuschätzen. Für BCR, BECCS und DACCS wurde eine Analyse auf Komponentenebene durchgeführt, um die Komplexität und Kritikalität der einzelnen Komponenten zu verstehen und um festzustellen, ob diese Komponenten angesichts der bestehenden Zuliefererlandschaft von europäischen/deutschen Unternehmen zu wettbewerbsfähigen Kosten geliefert werden könnten.

Das europäische und deutsche Wirtschaftspotenzial bezieht sich auf den potenziellen Anteil an der weltweiten CDR-Wertschöpfung, den europäische und deutsche Unternehmen erzielen könnten. Diese Potenziale umfassen die Lieferung von Technologie, Ausrüstung und Dienstleistungen, unabhängig davon, wo CDR-Projekte implementiert und Anlagen installiert werden. Der Begriff „Europa“ bezieht sich in diesem Bericht auf die EU-27-Mitgliedstaaten, nicht auf das geografische Europa, und wird im Folgenden synonym verwendet. Abbildungen beziehen sich ausdrücklich auf die EU-27.

## Europa und Deutschland haben das Potenzial, bis 2050 eine 110 bis 220 Milliarden Euro große Industrie aufzubauen

In den unter 2°C- und 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfaden könnte das CDR-induzierte Wirtschaftspotenzial in Deutschland 35–70 Mrd. EUR erreichen, während das Wirtschaftspotenzial für die EU-27 (einschließlich Deutschland) bis 2050 110–220 Mrd. EUR erreichen könnte. Dieses Wachstum würde einen erheblichen Beitrag zu den jeweiligen BIPs leisten. Für Deutschland entspricht dies etwa 2 % seines derzeitigen BIP unter dem 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad (zum Vergleich: der Automobilssektor macht derzeit 4,5 % des deutschen BIP aus). Es ist wichtig zu beachten, dass die berechneten wirtschaftlichen Potenziale eine kostenbasierte Sichtweise widerspiegeln, einschließlich der durchschnittlichen Margen für Intermediäre. Sie spiegeln jedoch nicht die potenzielle künftige Angebots- und Nachfragedynamik wider, die zu unterschiedlichen Marktpreisen führen könnte, z. B. aufgrund eines Unterangebots an Zertifikaten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Außerdem werden die Gewinnmargen der Lieferanten zwischen den verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette nicht eliminiert.

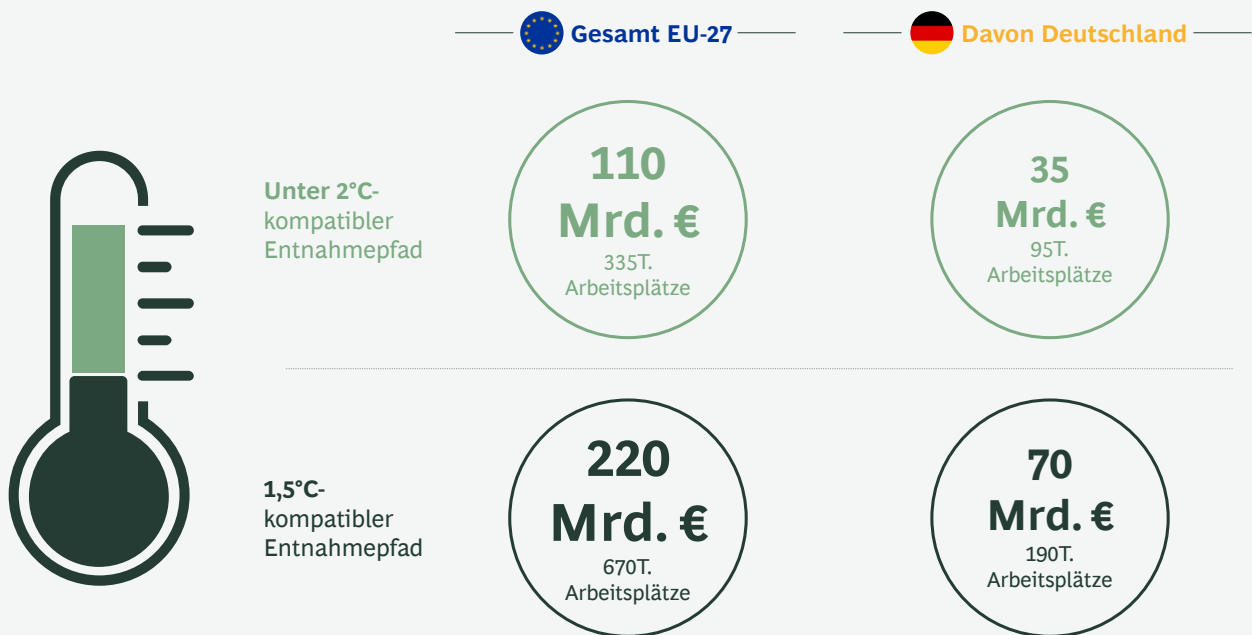
<sup>22</sup> BMWK, 2024.

<sup>23</sup> Helmholtz, TU Berlin, 2024.

## ABBILDUNG 18

### CDR-induziertes wirtschaftliches und arbeitsplatzbezogenes Potenzial (p.a., 2050)

EU-27 Deutschland Ausgewogenes Portfolio



Quelle: DVNE Arbeitsgruppe; BCG-Analyse

Die Entwicklung dieser Branche könnte die deutsche und die europäische Wirtschaft verändern, indem sie Innovationen, die Schaffung von Arbeitsplätzen und nachhaltiges Wachstum vorantreibt. Abbildung 18 verweist auf das Potenzial für die Schaffung von Arbeitsplätzen, das im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

Das wirtschaftliche Potenzial für Europa und Deutschland im Zeitverlauf ist in Abbildung 19 detailliert dargestellt. Da erwartet wird, dass das CDR-Wachstum nach 2030 einsetzt und sich frühe Investitionen deutscher Akteure auszuzahlen beginnen, könnte das wirtschaftliche Potenzial 20 bis 30 Mrd. EUR im Jahr 2040 erreichen, und zwar in Entnahmepfaden, die mit unter 2°C und 1,5°C kompatibel sind. Bis 2050 könnten die deutschen Akteure in den jeweiligen Szenarien 35–70 Mrd. EUR einnehmen. Das Potenzial für Europa als Ganzes, ohne Deutschland, ist ebenfalls beträchtlich. Bis 2040 könnte das CDR-induzierte Wirtschaftspotenzial in unter 2°C- und 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfaden 40–70 Mrd. EUR erreichen. Bis 2050 könnten die europäischen Akteure außerhalb Deutschlands 75–150 Milliarden Euro einnehmen. Diese Anteile am globalen Potenzial würden die starke techno-

logische Basis Europas und seine strategischen Investitionen in Forschung und Entwicklung widerspiegeln. Der allmähliche Anstieg des Marktanteils ab 2025 deutet auf einen möglichen soliden Wachstumspfad für den CDR-Sektor hin, der von unterstützenden politischen Maßnahmen und kontinuierlichen Fortschritten insb. bei CDR-Technologien angetrieben wird.

Das größte Potenzial für europäische und deutsche Akteure wird für DACCS, BECCS und BCR erwartet

Europa und Deutschland sind aufgrund ihrer Technologieführerschaft besonders gut positioniert, um von den wachsenden Märkten für DACCS, BECCS und BCR zu profitieren. Es wird erwartet, dass diese Verfahren bis 2050 ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial für die Lieferung von Anlagen und technologischen Komponenten bieten werden. Darüber hinaus könnten Europa und Deutschland durch frühzeitige Investitionen erhebliche Anteile an den rasch expandierenden Märkten für MRV und Intermediärsdienstleistungen gewinnen.

## ABBILDUNG 19

### CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial nach Region (Mrd. € p.a., 2023-2050) Global EU-27 Deutschland Ausgewogenes Portfolio

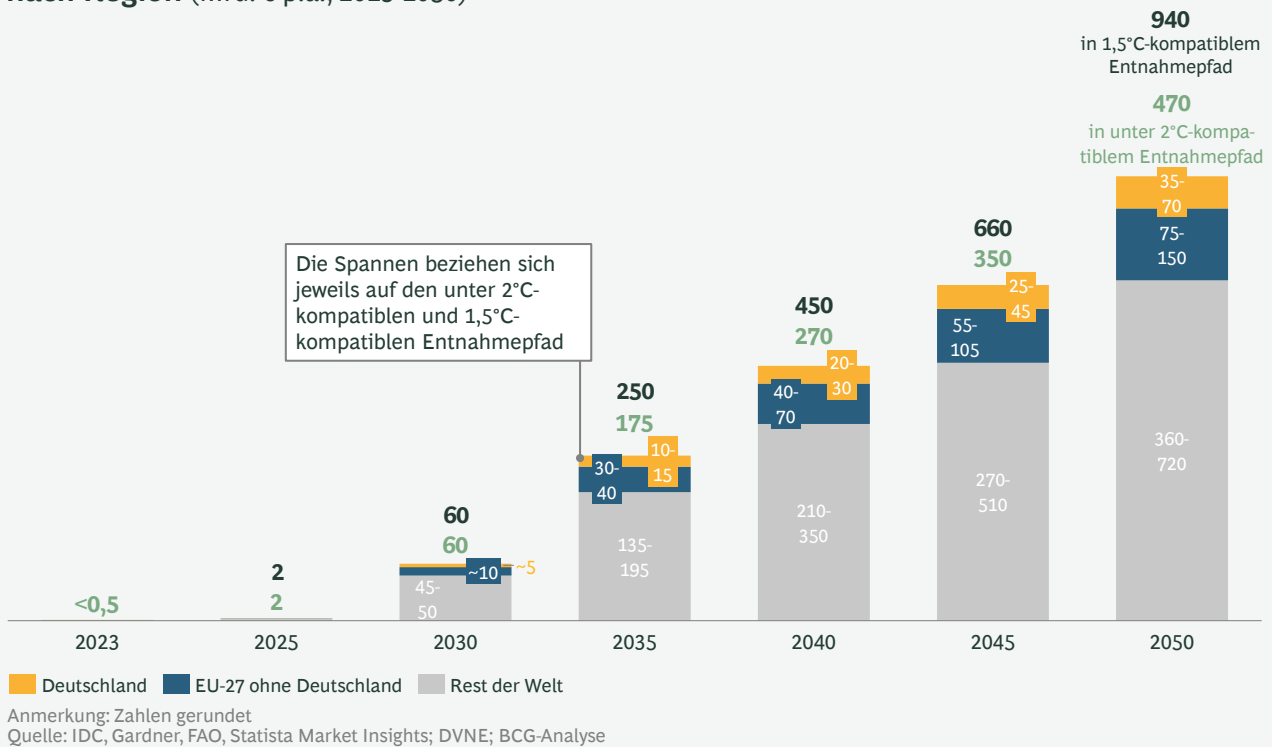


Abbildung 20 veranschaulicht die wirtschaftlichen Potenziale je CDR-Methode im Jahr 2030 und 2050 für europäische bzw. deutsche Akteure. Das wirtschaftliche Potenzial für deutsche BECCS-Akteure könnte für unter 2°C- bzw. 1,5°C-kompatible Entnahmepfade im Jahr 2030 1,1 Mrd. EUR erreichen und bis 2050 auf 19–38 Mrd. EUR ansteigen. In Europa (ohne Deutschland) könnte BECCS im Jahr 2030 2,1 Mrd. EUR erreichen und bis 2050 auf 34–68 Mrd. EUR anwachsen, wenn die jeweiligen Szenarien zugrunde gelegt werden. In ähnlicher Weise wird für DACCS in den unter 2°C- bzw. 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfaden bis 2050 ein wirtschaftliches Potenzial von 7–14 Mrd. EUR für Deutschland und 19–39 Mrd. EUR für Europa (ohne Deutschland) prognostiziert. Das wirtschaftliche Potenzial für BCR könnte 2050 in Deutschland 2–5 Mrd. EUR und in Europa (ohne Deutschland) 6–12 Mrd. EUR erreichen. Bereits heute sind deutsche und europäische Akteure führend in der BCR-Produktionstechnologie und deren kontinuierlicher Verbesserung. Diese Potenziale zeigen die immensen Möglichkeiten und die entscheidende Rolle, die BECCS, DACCS und BCR in der deutschen und europäischen CDR-Landschaft spielen könnten.

### Auch bei weiteren CDR-Methoden wird ein Wachstum erwartet

Darüber hinaus bieten Aufforstung, Wiederaufforstung und verbesserte Forstwirtschaft beträchtliche kommerzielle Möglichkeiten, vor allem wenn die Nachfrage nach hochwertigem MRV steigt (insb. Messung bzw. Überwachung) und selbst Premium-Projekte preislich deutlich unter 100 EUR pro Tonne CO<sub>2</sub> liegen können. Die wachsende Nachfrage nach MRV- und Intermediärsdienstleistungen könnte auch neue Wachstumsmöglichkeiten eröffnen, insbesondere für Early Mover, die diese neuen Chancen nutzen können. Es besteht ein erhebliches Potenzial für europäische und deutsche Akteure im ERW-Bereich, vor allem aufgrund des Bedarfs an innovativen und kosteneffizienten MRV-Lösungen. Die erwartete Zunahme des Einsatzes beschleunigter natürlicher Prozesse und technologiegestützter Entnahme sowie die Ausweitung des MRV-Marktes könnten die Position Europas und Deutschlands als Katalysatoren und Vorreiter der globalen CDR-Industrie stärken.



Das Potenzial anderer Methoden, insbesondere der ozeanbasierten CDR, ist noch unklar. Sie befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, aber das wirtschaftliche Potenzial für die europäischen Akteure könnte vergleichsweise gering ausfallen.

### Industrie und verarbeitendes Gewerbe könnten am meisten vom CDR-Wachstum profitieren

Die deutsche Industrie und das verarbeitende Gewerbe können vom Ausbau des CDR erheblich profitieren. Bedeutende Marktanteile werden im Anlagen- und Maschinenbau sowie im Komponentenbereich erwartet. Darüber hinaus birgt der Dienstleistungssektor ein erhebliches Potenzial, insbesondere dann, wenn die europäischen Akteure frühzeitige Investitionen in MRV und den Intermediärbereich nutzen können. Die Chancen für europäische und deutsche Dienstleister liegen vor allem in der Softwareentwicklung, z. B. in der Datenaggregation und -analyse, in Systemen zur Messung und Berichterstattung, in MRV-Simulations- und Modellierungssoftware, in Zertifikats-Marktplätzen und in der API-Integration von CO<sub>2</sub>-Entnahmeprojekten.

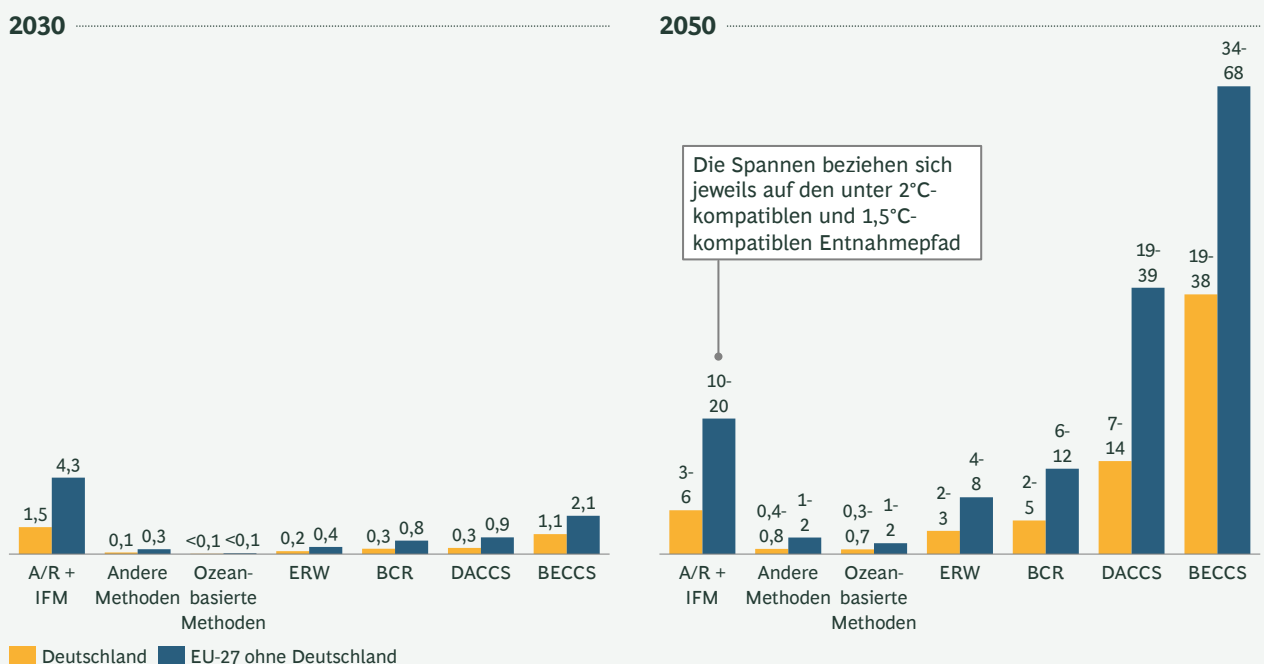
Auch im Energie-, Bau- und Verkehrssektor könnten sich erhebliche Chancen ergeben, wenn sie CDR-Technologien und -Dienstleistungen in ihren Betrieb integrieren. Der Energiesektor kann von der Fokussierung einer Projektregion auf nachhaltige Energielösungen profitieren. Im Verkehrssektor sind weitere Innovationen bei CO<sub>2</sub>-Transport- und -Speichertechnologien zu erwarten, z. B. verbesserte kryogene Kesselwagen oder spezielle CO<sub>2</sub>-Träger, die zum Gesamtwachstum und zur Nachhaltigkeit der Branche beitragen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass CDR eine transformative Chance für Europa und Deutschland darstellt. Deutschland und Europa können eine Führungsrolle in der globalen CDR-Industrie übernehmen, indem sie sich auf Bereiche mit hohem Potenzial wie DACCS, BECCS, BCR und MRV-Dienste über verschiedene CDR-Methoden hinweg konzentrieren. Durch die Nutzung ihrer Stärken in der Industrie und im verarbeitenden Gewerbe können sie gleichzeitig Wirtschaftswachstum und Nachhaltigkeit fördern.

#### ABBILDUNG 20

#### CDR-induziertes wirtschaftliches Potenzial nach Methode und Region (Mrd. € p.a., 2030 und 2050)

■ EU-27 ■ Deutschland ■ Ausgewogenes Portfolio



Quelle: IDC; Gardner; FAO; Statista Market Insights; Markets and Markets; DVNE; BCG-Analyse

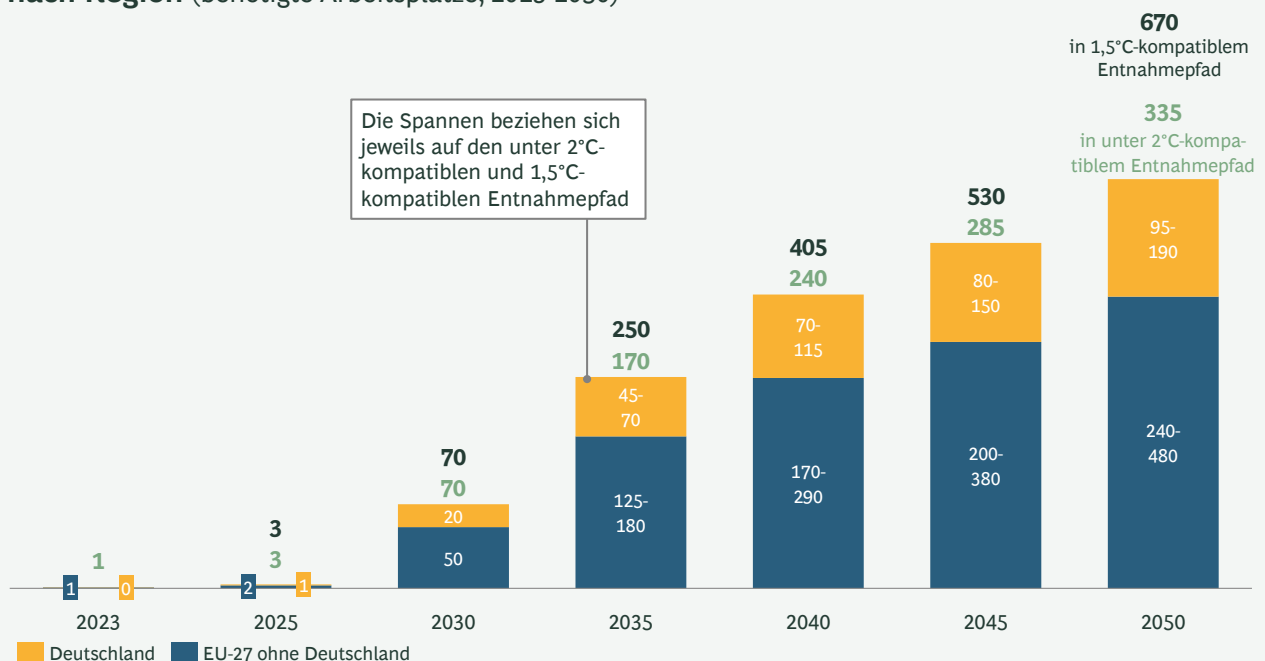
## 4.2 Potenzial für 95–190 Tsd. CDR-induzierte Arbeitsplätze in Deutschland

Die Entwicklung der CDR-Industrie könnte nicht nur ein erhebliches Wirtschaftswachstum, sondern auch die Schaffung von Arbeitsplätzen mit sich bringen. Das Potenzial für CDR-induzierte Arbeitsplätze in Deutschland und Europa ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Potenziale beziehen sich auf die Bruttobeschäftigung im jeweiligen Jahr, nicht auf die zusätzlich geschaffenen Arbeitsplätze in diesem Jahr. Bis 2050 könnte der CDR-Sektor in Europa bis zu 670.000 Arbeitsplätze schaffen, davon bis zu 190.000 in Deutschland. Dieser Wachstumspfad deutet auf beträchtliche Beschäftigungsmöglichkeiten in verschiedenen Sektoren hin, die mit CDR zu tun haben, darunter Maschinen- und Anlagenbau, Energie und (digitale) Dienstleistungen.

Wenn sich CDR so entwickelt, wie in den 1,5°C- und 2°C-kompatiblen Entnahmepfaden modelliert, wird das Arbeitsplatzpotenzial in der CDR-Industrie voraussichtlich zunächst langsam zunehmen. In den nächsten Jahren wird es voraussichtlich relativ niedrig bleiben und danach allmählich ansteigen. Bis 2035 könnte der Sektor jedoch bereits 45.000–70.000 Arbeitsplätze in Deutschland und 125.000–180.000 Arbeitsplätze in ganz Europa unter 2°C- und 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfaden ermöglichen, angetrieben durch den zunehmenden Einsatz von CDR-Technologien und die Skalierung der damit verbundenen Dienstleistungen und Infrastruktur. Bis 2050 könnte der Arbeitsmarkt in den jeweiligen Szenarien weiter wachsen und 95.000–190.000 Arbeitsplätze in Deutschland sowie 240.000–480.000 in anderen europäischen Ländern schaffen.

ABBILDUNG 21

**CDR-induziertes arbeitsplatzbezogenes Potenzial nach Region** (benötigte Arbeitsplätze, 2023-2050) ■ EU-27 ■ Deutschland ■ Ausgewogenes Portfolio



**Annahme:** Reduktion der Arbeitsplätze pro €1M um -2 % p.a. angenommen, bedingt durch Automatisierung und Digitalisierung der Wirtschaft

Quelle: Eurostat; Oxford Economics; DVNE; BCG-Analyse

Dieses Potenzial verdeutlicht die großen Chancen für die deutsche und europäische Wirtschaft, wenn die Klimaverpflichtungen eingehalten und entsprechende Investitionen in den Markt für die CO<sub>2</sub>-Entnahme getätigt werden.

Das Arbeitsplatzpotenzial wird auf der Grundlage des derzeitigen Verhältnisses von Arbeitsplätzen je 1 Million Euro Wertschöpfung geschätzt.<sup>24</sup> Automatisierung und Digitalisierung, insbesondere im

Dienstleistungssektor und im Maschinenbau, könnten zu einer erheblichen Verringerung der Zahl der erforderlichen Arbeitsplätze je 1 Mio. EUR Wertschöpfung führen. Diese Verringerung ist berücksichtigt worden. Das rasche Wachstum des CDR-induzierten Wirtschaftspotenzials könnte jedoch immer noch zu einer beträchtlichen Schaffung von Arbeitsplätzen führen, die den Verringerungseffekt kompensiert.

## 4.3 Deutschland als Katalysator und Koordinator für CDR

Deutschland ist in einer einzigartigen Position, um CDR-Initiativen in ganz Europa und darüber hinaus voranzutreiben und zu koordinieren, indem es seine starke Ausgangslage in mehreren Schlüsselbereichen nutzt:

### Fortschrittliche Klimapolitik

Die Verpflichtung Deutschlands auf ambitionierte Klimaziele, wie das Erreichen von Netto-Null-Emissionen bis 2045, schafft die Voraussetzungen für wesentliche Fortschritte und Implementierungen im Bereich CDR. Die fortschrittliche Klimapolitik der Regierung schafft ein förderliches Umfeld für die Entwicklung und den Einsatz von CDR, indem sie regulatorische Unterstützung gewährleistet und öffentliche Investitionen in nachhaltige Technologien lenkt.

### Einflussnahme auf europäische Entscheidungen

Als politische Führungsmacht in Europa beeinflusst Deutschland die europäischen Klimastrategien maßgeblich mit. Diese Fähigkeit, europäische und globale CDR-Bemühungen zu gestalten, macht Deutschland zu einem wichtigen Akteur, der die Klimaagenda des Kontinents vorantreibt.

### Starkes Innovationszentrum

Deutschland steht weltweit auf Platz 8 der innovativsten Länder, was seine starke Innovationskultur

widerspiegelt.<sup>25</sup> Mit zahlreichen Patenten und führenden Technologieunternehmen ist Deutschland führend in der Entwicklung modernster CDR-Technologien und -Lösungen. Die solide Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur des Landes unterstützt die kontinuierliche Innovation im Bereich CDR und macht es zu einem wichtigen Zentrum für technologische Fortschritte in diesem Sektor.

### Wirtschaftlicher Motor

Als drittgrößte Volkswirtschaft<sup>26</sup> und Exporteur<sup>27</sup> der Welt bietet die starke industrielle Basis Deutschlands ein entscheidendes Fundament für CDR-Initiativen. Diese wirtschaftliche Stärke gewährleistet die Verfügbarkeit der notwendigen Ressourcen für die Ausweitung von CDR-Projekten und bietet einen attraktiven Pool an potenziell großen industriellen CDR-Abnehmern, wie z. B. multinationale Technikkonzerne.


Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Deutschlands fortschrittliche Klimapolitik, seine einflussreiche Rolle bei europäischen Entscheidungen, sein starkes Innovations-Ökosystem und seine robuste Wirtschaft Deutschland zu einem führenden Katalysator und Koordinator für CDR in Europa und darüber hinaus machen können. Indem es diese Stärken nutzt, kann Deutschland das Wachstum von CDR-Methoden, insbesondere im technischen Bereich, vorantreiben und die erfolgreiche Umsetzung von CDR-Projekten in großem Maßstab unterstützen.

<sup>24</sup> Basierend auf Daten von Eurostat und Oxford Economics.

<sup>25</sup> WIPO Global Innovation Index, 2024.

<sup>26</sup> Politico, 2024.

<sup>27</sup> World Trade Organization, 2024.

An aerial photograph of a winding asphalt road through a mountainous landscape. The road curves through green hills and valleys, with a small stream visible in the distance. The sky is filled with soft, golden light from a low sun, creating a hazy atmosphere over the mountains. The overall scene is serene and scenic.

**Um das Potenzial von  
CDR voll auszuschöpfen,  
müssen die Akteure im  
CDR-Ökosystem  
gemeinsam entschlossene  
Maßnahmen entlang eines  
15-Punkte-Aktionsplans  
ergreifen.**



## 5 **Entschiedenenes Handeln von Politik, Industrie, Käufern und Investoren ist jetzt gefragt**

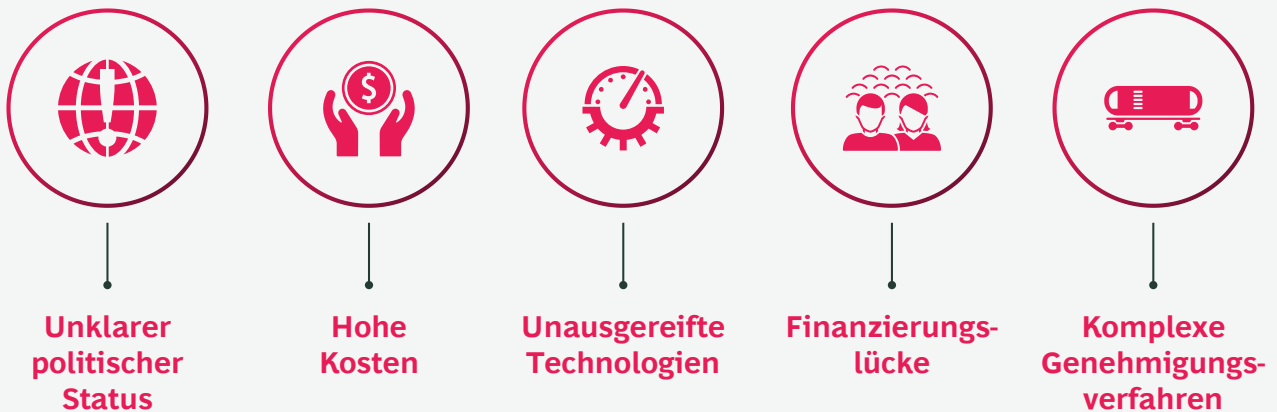
### 5.1 Ein 15-Punkte-Aktionsplan zur Überwindung von CDR-Hindernissen

Die derzeitigen Hindernisse machen die Entwicklung des CDR-Marktes, die Wertschöpfung und das Beschäftigungspotenzial höchst ungewiss

Trotz des enormen Klimaschutz- und Wirtschaftspotenzials, das CDR bieten könnte, ist es, wie in diesem Bericht erläutert, höchst ungewiss, ob sich

CDR wie in einem 2°C- oder 1,5°C-kompatiblen Entnahmepfad prognostiziert entwickeln und wachsen wird. Mehrere Hindernisse stehen derzeit einer raschen Skalierung der CDR-Industrie entgegen (Abbildung 22). Die ganzheitliche Beseitigung dieser Hindernisse ist von entscheidender Bedeutung, um das volle Potenzial von CDR-Methoden zu erschließen und ihre entscheidende Rolle bei der Eindämmung des Klimawandels zu nutzen.

ABBILDUNG 22



## Unklare Klimapolitik macht die Integration von CDR schwierig

Trotz der jüngsten Fortschritte bei der Entwicklung der CDR-Politik in Europa und Deutschland gibt es immer noch erhebliche Lücken, und viele Länder müssen CDR ausdrücklich in ihre Klimastrategien einbeziehen. Die unklare Rolle von CDR in der übergreifenden Klimapolitik behindert seine Integration in bestehende Regelungen und Marktmechanismen. Ähnlich wie bei den erneuerbaren Energiequellen vor etwa 30 Jahren befinden sich Forschung und Entwicklung im Bereich CDR noch in der Entwicklung, und wirksame politische Instrumente müssen noch geschaffen werden. Während europäische Mechanismen und Regulatorik wie das Emissionshandelssystem und die LULUCF-Verordnungen bereits verabschiedet wurden, befinden sich andere, wie die deutsche „Langfriststrategie Negativemissionen“ (LNe), noch in der Entwicklung, wobei Entwürfe für 2025 erwartet werden. Die EU hat sich außerdem kürzlich darauf geeinigt, einen Zertifizierungsrahmen (CRCF) einzurichten, der neben technischer CO<sub>2</sub>-Entnahme mit geologischer Speicherung auch für die Speicherung in Produkten und Kohlenstoffbindung in Ökosystemen bzw. Landsenken („Carbon Farming“) gelten soll. Die Zertifizierung im Rahmen von CRCF ist ab 2026 geplant - dieser Zeitplan ist jedoch sehr vorläufig. Die konkreten Auswirkungen von Mechanismen wie der Green-Claims-Directive (GCD), die Leitplanken für Nachweisbarkeit und Kommunikation umweltbezogener Produktangaben setzt, die Unternehmen im Zusammenhang mit dem Erwerb von Emissionszertifikaten machen können, müssen noch untersucht werden. Das Fehlen spezieller Zielvorgaben für die CO<sub>2</sub>-Entnahme in der deutschen und europäischen Gesetzgebung hindert die Unternehmen außerdem daran, umsetzbare Strategien zu entwickeln.<sup>28</sup> Während 11 europäische Länder keine CDR-Ziele haben, gibt es in weiteren 11 Ländern nur Ziele für Landnutzung, Land-

nutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).<sup>29</sup> Außerdem gibt es keine klare Verbindung zum EU-Emissionshandelssystem (ETS), so dass CDR-Käufe aktuell vollkommen freiwillig sind. Klare Bilanzierungsregeln müssen noch entwickelt werden.<sup>30</sup> Diese Unklarheit schafft Unsicherheit, insbesondere für Investoren und CDR-Käufer, und behindert die breite Einführung von CDR.

## Viele CDR-Methoden sind noch zu kostspielig

Viele CDR-Methoden sind nach wie vor teurer als Vermeidungszertifikate (*Englisch* „Avoidance“), was häufig auf die hohen Investitionskosten zurückzuführen ist.<sup>31</sup> So können beispielsweise technologiebasierte CDR-Methoden wie DACCS über 700 EUR pro Tonne kosten, was sie für viele Käufer unattraktiv macht, wenn günstigere, anrechenbare CDR-Zertifikate verfügbar sind. Die hohen Kosten dieser Verfahren verhindern einen zeitnahen Anstieg der Nachfrage, da nur wenige Käufer bereit sind, im Jahr 2023 Spitzenpreise zu zahlen. Nur 0,5 % der Unternehmen mit wissenschaftlich fundierten Zielen (gem. SBTi) haben CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikate mit hoher Dauerhaftigkeit gekauft, was die geringe Zahlungsbereitschaft unterstreicht. Die überwiegende Mehrheit der gekauften Zertifikate kann nur einer Handvoll von Unternehmen zugeschrieben werden.<sup>32</sup>

## Noch nicht ausgereifte CDR-Technologien müssen bei wichtigen Parametern verbessert werden

Da mehrere CDR-Methoden erst im Entstehen sind und einen relativ geringen (technologischen) Reifegrad aufweisen, müssen wichtige

<sup>28</sup> The State of Carbon Dioxide Removal, 2014.

<sup>29</sup> Manhart, S., 2023.

<sup>30</sup> European Zero Emission Technology and Innovation Platform, 2021.

<sup>31</sup> Prado et al., 2023.

<sup>32</sup> Cdr.fyi, 2023.

Parameter verbessert werden, z. B. die Abscheidungseffizienz, die Energieintensität oder die anschließende Dauerhaftigkeit der Speicherung. Komplexe MRV-Ansätze und Glaubwürdigkeitsprobleme in Bezug auf die Überprüfbarkeit von abgeschiedenem/gespeichertem CO<sub>2</sub> könnten den Fortschritt weiter behindern.<sup>33</sup> Diese Probleme sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Branche noch relativ neu und fragmentiert ist.

## Eine erhebliche Finanzierungslücke behindert das Wachstum der CDR-Projekte

Die derzeitige Investitionslücke schränkt die Finanzierung und den kommerziellen Betrieb vieler CDR-Projekte ein.<sup>34</sup> Dies wird dadurch verschärft, dass die meisten dauerhaften technologiebasierten CDR-Methoden hohe Vorabinvestitionen erfordern, lange Amortisationszeiten haben und Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige Kohlenstoffmärkte mit sich bringen. Insbesondere erhalten technologiebasierte, CAPEX-intensive CDR-Projekte teils keine endgültige Investitionsentscheidung, da sie oft nicht bankfähig sind, weil nur wenige potenzielle Käufer bereit sind, langfristige Abnahmevereinbarungen für CDR-Zertifikate abzuschließen, um eine Bindung an hohe Preise zu vermeiden. Langfristige Abnahmevereinbarungen sind jedoch eine wichtige Voraussetzung für die Finanzierung von Projekten durch Banken. Gleichzeitig haben CDR-Startups und „Scale-ups“ Schwierigkeiten, (Eigenkapital-) Investoren anzuziehen, da die Aussichten für die CDR-Branche insgesamt unsicher bleiben. Obwohl es Anzeichen für eine wachsende Dynamik bei pri-

vaten Investitionen im CDR-Bereich gibt, konzentrieren sich diese Investitionen weitgehend auf die USA und Kanada sowie auf die Seed- bzw. Vorwachstumsphasen.<sup>35</sup> Ohne eine geeignete und maßgeschneiderte Projektfinanzierung und Unterstützung in der Wachstumsphase werden CDR-Initiativen weiterhin Schwierigkeiten haben, sich in Richtung FID zu bewegen.

## Komplexe Genehmigungsverfahren können Infrastruktur-Entwicklung oder Anlagenbetrieb verzögern

Die Infrastruktur, insbesondere die Versorgung mit erneuerbaren Energien und die CO<sub>2</sub>-Transportnetze, sind von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung mehrerer CDR-Methoden in großem Maßstab. Diese wesentlichen Komponenten stehen jedoch vor erheblichen Genehmigungsproblemen. So erfordern beispielsweise Pipelines für den CO<sub>2</sub>-Transport und sichere geologische Lagerstätten umfangreiche behördliche Genehmigungen.<sup>36</sup> Darüber hinaus können komplexe Genehmigungsverfahren für den Betrieb von Anlagen zu Verzögerungen und höheren Kosten führen, was die rechtzeitige Inbetriebnahme und Skalierung von CDR-Projekten behindert. Auf nationaler Ebene hat die Carbon Management-Strategie (CMS) eine Überarbeitung des aktuellen Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) angestoßen, um die Genehmigungsverfahren für Transport- und Speicherinfrastrukturen zu beschleunigen und zu verschlanken und die Kohlendioxidspeicherung in großem Maßstab rechtlich zu ermöglichen. Dieser Prozess ist jedoch noch nicht abgeschlossen.

<sup>33</sup> Jones et al., 2024; World Resources Institute, 2023.

<sup>34</sup> The Time for Carbon Removal Has Come, 2023.

<sup>35</sup> CDR.fyi, 2024.

<sup>36</sup> Blanchard et al., 2024, Edenhofer et al., 2021.

## Die Einführung von CDR erfordert ein kohärentes Vorgehen der vier wichtigsten Stakeholdergruppen

**Die politischen Entscheidungsträger** sollten sich strategisch für CDR engagieren, indem sie Technologieforschung und Projektinbetriebnahmen finanzieren und dedizierte Ziele für die CO<sub>2</sub>-Entnahme festlegen.

**Die CDR-Industrie** sollte die Abscheidungseffizienz und -kapazität verbessern und gleichzeitig die Stückkosten senken und „Early Movers“ aktivieren.

**CDR-Käufer** sollten sich verpflichten, langfristig hochwertige CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikate in ihre Unternehmensportfolios aufzunehmen und sich allmählich von Vermeidungszertifikaten zu lösen.

**Investoren** können als Vermittler zwischen politischen Entscheidungsträgern, Versicherern und CDR-Projektentwicklern fungieren.

Der vorgeschlagene 15-Punkte-Aktionsplan soll die erforderlichen Maßnahmen katalysieren und koordinieren (Abbildung 23).

15-Punkte-Aktionsplan für Stakeholdergruppen vor, um die CDR-Nutzung voranzutreiben



### POLITISCHE ENTSCHEIDUNGSTRÄGER

---

- 1 Etablierung von CDR als integraler Bestandteil der Klimapolitik und Festlegung dedizierter Ziele
- 2 Einbeziehung von CDR in Compliance-Markt (z. B. Verknüpfung mit EU-ETS, Corsia)
- 3 Finanzierung von Forschungsprogrammen und CDR-Projekten im Anfangsstadium
- 4 Bereitstellung von Sicherheiten und Subventionen für die Implementierung spezifischer CDR-Projekte
- 5 Beseitigung regulatorischer Hürden und Hindernisse, die die Einführung von CDR verhindern
- 6 Förderung des Ausbaus der (grenzüberschreitenden) Infrastruktur und Speicherung
- 7 Steigerung der CDR-Nachfrage durch öffentliche Aufträge



### CDR-INDUSTRIE

---

- 8 Erhöhung des Reifegrads und Industrialisierung der Produktion zur Erzielung von Skaleneffekten
- 9 Unterstützung der Forschung zur Verbesserung der CDR-Parameter und der Transparenz
- 10 Aktivierung von "Early Movers" unter den Kunden



### CDR-KÄUFER

---

- 11 Umstellung des freiwilligen Portfolios von Vermeidungszertifikaten auf Entnahmezertifikate
- 12 Abschließen langfristiger Abnahmeverträge und finanzielle Verpflichtungen
- 13 Förderung der vollen Anrechenbarkeit von CDR-Zertifikaten auf die Klimaziele
- 14 Entwicklung starker Kommunikationsstrategien und Einbeziehung der Öffentlichkeit



### INVESTOREN

---

- 15 Entwicklung von Projektfinanzierungslösungen zur Schließung der CDR-Finanzierungslücke



## 5.2 Politische Entscheidungsträger

### 1: Etablierung von CDR als integraler Bestandteil der Klimapolitik und Festlegung dedizierter Ziele

Die politischen Entscheidungsträger sollten CDR eng in die Klimapolitik einbeziehen, indem sie CDR ausdrücklich als integralen Bestandteil des Erreichens der Klimaziele deklarieren und sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene spezifische Entnahmeziele, insbesondere für schwer zu vermeidende Restemissionen festlegen. Sie könnten zum Beispiel als Teil der Dekarbonisierungspläne vorschreiben, dass jährlich ein bestimmter Anteil verbleibender Gesamtemissionen durch CDR neutralisiert werden muss. Die Festlegung schrittweiser jährlicher CDR-Ziele, um die Fortschritte zu verfolgen und die Politik bei Bedarf anzupassen, könnte den CDR-Markt auf lange Sicht effektiv wachsen lassen. Darüber hinaus kann die Unterscheidung zwischen dauerhafter und temporärer CO<sub>2</sub>-Entnahme in diesen Maßnahmen einen maßgeschneiderten Ansatz zur Skalierung von CDR gewährleisten.

### 2: Einbeziehung von CDR in Compliance-Markt (z. B. Verknüpfung mit EU-ETS, Corsia)

Die EU sollte die Möglichkeit einer Verknüpfung von CDR mit den bestehenden EU-Emissionshandelssystemen (ETS) eingehend prüfen. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, die Unterschiede zwischen CO<sub>2</sub>-Entnahme und Emissionsreduzierung anzuerkennen um eine Doppelzählung zu vermeiden, sowie die zeitliche Verzögerung des Effektes von CO<sub>2</sub>-Entnahme im Gegensatz zu Reduktion zu berücksichtigen.<sup>37</sup> Nichtsdestotrotz könnte die Möglichkeit, 10 % der erforderlichen EU-Emissionszertifikate durch CDR-Zertifikate zu ersetzen oder die CDR-Governance an bestehende Emissionsminderungsmechanismen anzugleichen, dazu beitragen, die Nachfrage nach CDR zu steigern und zu koordinieren. Alternativ könnte auf EU-Ebene eine "Kohlenstoffzentralbank" eingerichtet und in die EZB integriert werden, die CO<sub>2</sub>-Entnahme subventioniert, indem sie sie in Emissionszertifikate umwandelt, wie es das Kieler Institut und das Potsdam-Institut vorgeschlagen haben.<sup>38</sup>

### 3: Finanzierung von Forschungsprogrammen und CDR-Projekten im Anfangsstadium

Die Finanzierung maßgeschneiderter F&E-Programme für die CDR-Grundlagenforschung und der Abbau administrativer Hürden für Subventionsprogramme können CDR-Innovationen beschleunigen. So können beispielsweise direkte CAPEX-Zuschüsse, wie sie von der EIB gewährt werden, eine wichtige finanzielle Unterstützung in der Anfangsphase bieten, während Innovationszentren oder Inkubatoren die Zusammenarbeit und die schnelle Entwicklung von CDR fördern könnten. Darüber hinaus könnten Universitäten und Forschungsinstitute dabei unterstützen, das Tempo der CDR-Innovation zu erhöhen. Die Schaffung öffentlich-privater Partnerschaften würde die Erprobung und Weiterentwicklung neuartiger CDR-Methoden erleichtern und dazu beitragen, regulatorische Hindernisse und Wissenslücken zu ermitteln und zu adressieren, die weitere Zeit und Investitionen erfordern.

### 4: Bereitstellung von Sicherheiten und Subventionen für die Implementierung spezifischer CDR-Projekte

Das Angebot von staatlich gesicherten Wertpapieren, Einspeisetarifen, Differenzverträgen oder Käuferrabatten kann den Markt stabilisieren und Investitionen fördern. Staatliche Garantien wurden in Schwellenländern eingesetzt, um Investitionen in erneuerbare Energien anzuziehen, und könnten ein geeignetes Instrument sein, um das Restrisiko der Investoren zu verringern.<sup>39</sup> Einspeisetarife und Differenzverträge können sowohl die Anbieter als auch die Investoren vor Schwankungen der Preise für CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikate absichern. Maßnahmen wie diese können die Herausforderungen bei den Investitionskosten abmildern und die Einführung von CDR in Deutschland und Europa durch in- und ausländische CDR-Akteure fördern.

<sup>37</sup> TechEthos, 2023.

<sup>38</sup> Kiel Institute for the World Economy, 2024; Edenhofer et al., 2023.

<sup>39</sup> IRENA, 2020.

## 5: Beseitigung regulatorischer Hürden und Hindernisse, die die Einführung von CDR verhindern

Um Investoren anzuziehen, sollten die politischen Entscheidungsträger auf europäischer Ebene ihre CDR-bezogene Terminologie mit der des IPCC harmonisieren und alle CDR-Methoden ausdrücklich als „grüne Investitionen“ in die EU-Taxonomie und die Verordnung über die Offenlegung nachhaltiger Finanzen (SFDR) aufnehmen. Klare Rechnungslegungsstandards (z. B. für MRV) und die Anpassung von Versicherungsvorschriften zur Erleichterung der „Versicherbarkeit“ von Lieferrisiken können ebenfalls die Hürden für CDR-Investitionen senken.

Auf nationaler Ebene werden beispielsweise die kürzlich vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) vorgelegten Änderungen des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpG) begrüßt<sup>40</sup>, könnten aber noch weiter gehen, um die Onshore-CO<sub>2</sub>-Speicherung in Deutschland in der Bundesgesetzgebung zuzulassen. Eine enge Verzahnung verwandter Gesetzgebungen und Mechanismen wie der LNe und des KSpG auf deutscher Ebene wird entscheidend sein, um Redundanzen, Lücken und teils widersprüchliche Bestimmungen zu vermeiden.

## 6: Förderung des Ausbaus der (grenzüberschreitenden) Infrastruktur und Speicherung

Der Aufbau einer Infrastruktur zur Unterstützung von CDR-Technologien und die Förderung bilateraler grenzüberschreitender Vereinbarungen über den Transport und die Speicherung von Kohlenstoff oder CO<sub>2</sub> können die zeitnahe Skalierung von CDR fördern. Eine zentrale Herausforderung ist das Fehlen einer einheitlichen internationalen Lösung für den grenzüberschreitenden Transport von CO<sub>2</sub> – ein Problem, das durch die Ratifizierung der Änderung von Artikel 6 des Londoner Protokolls zumindest verringert werden könnte. Die Ratifizierung würde den Export von CO<sub>2</sub> zur dauerhaften Offshore-Speicherung ermöglichen.<sup>41</sup> Darüber hinaus sollten bei der Planung lokaler und grenzüberschreitender Infrastruktur für CDR-Projekte auch erneuerbare Energieträger und Fernwärmenetze genau berücksichtigt werden. Der Bedarf an Transport- und Speicherinfrastruktur, einschließlich CO<sub>2</sub>-Pipelines, sollte sowohl auf nationaler als auch auf grenzüberschreitender Ebene ermittelt werden, um zu verstehen, wie die Transportmodalitäten optimiert werden können.

## 7: Steigerung der CDR-Nachfrage durch öffentliche Aufträge

Die Regierungen befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Integration von CDR in ihre Klimastrategien. Während nur wenige Länder spezielle Programme eingeführt oder umfangreiche CDR-Käufe getätigt haben, folgen andere langsam mit entsprechenden regulatorischen Fortschritten. Manch andere Länder sind keine ausdrücklichen Verpflichtungen eingegangen und haben keine Käufe getätigt. Die zuständigen Ministerien können das Vertrauen und die Investitionen in CDR-Methoden fördern, indem sie solche staatlichen Beschaffungsmaßnahmen unterstützen. Das US-Energieministerium ist mit gutem Beispiel vorangegangen und hat vor kurzem ein Finanzierungsprogramm aufgelegt, das es Unternehmen ermöglicht, sich für die Lieferung von CDR-Zertifikaten an die US-Regierung zu bewerben.<sup>42</sup> Ein Paradebeispiel in der EU ist Dänemark, wo die Regierung mit 1,1 Mio. Tonnen langlebiger CDR-Zertifikate den größten Kauf von CO<sub>2</sub>-Entnahme in der Geschichte getätigt hat.<sup>43</sup> Weitere europäische Länder und die deutsche Regierung könnten diesem Beispiel folgen und so zusätzliche Mittel für CDR-Unternehmen bereitstellen und starke positive Nachfragesignale senden.

<sup>40</sup> BMWK, 2024.

<sup>41</sup> Global CCS Institute, 2022.

<sup>42</sup> U.S. Department of Energy, 2024.

<sup>43</sup> Carboncredits.com, 2024.

## 5.3 CDR-Industrie

### 8: Erhöhung des Reifegrads und Industrialisierung der Produktion zur Erzielung von Skaleneffekten

Die CDR-Industrie sollte die Energieeffizienz erhöhen, um die Abhängigkeit von Energie-Infrastruktur wie bei DACCS zu verringern, und die Konzepte für die langfristige Speicherung weiter verbessern, um die Stabilität über geologisch relevante Zeiträume zu gewährleisten. Konkrete Beispiele hierfür sind Verbesserungen der Isolierung, der Abscheidungseffizienz von Sorptionsmitteln und Feststoffsorbenten sowie andere Maßnahmen. Die Entwicklung standardisierter Herstellungsverfahren und Anlagenkonfigurationen kann auch Skaleneffekte ermöglichen und die Kosten senken, insbesondere für technologiebasierte CDR-Lösungen. Dies kann durch die Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungsinstituten wie dem Fraunhofer-Institut und durch Partnerschaften mit großen deutschen oder europäischen Industrieunternehmen erreicht werden, um die Innovation in diesem Bereich zu beschleunigen.

### 9: Unterstützung der Forschung zur Verbesserung der CDR-Parameter und der Transparenz

Die Förderung von Forschungskonsortien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit, zur Verringerung des Risikos von Leckagen und zur Verbesserung der Genauigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmemessungen kann eine genauere Berichterstattung ermöglichen und Vertrauen in CDR-Lösungen schaffen. Digitale Lösungen wie künstliche Intelligenz und digitale Zwillinge könnten die Überwachungsleistung weiter steigern. Die Verbesserung technischer Schnittstellen für die Integration von CDR-Daten in die Nachhaltigkeitsberichte von Unternehmen und die gemeinsame Nutzung von Daten aus der Lieferkette können die Transparenz erhöhen und

so für Glaubwürdigkeit und eine breitere öffentliche Akzeptanz sorgen. Investitionen in Plattformen zur gemeinsamen Nutzung von Daten zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und damit zusammenhängenden Daten – etwa zu geologischen Speicherstätten – können CDR-Unternehmen bei der Suche nach optimalen Projektstandorten unterstützen.

### 10: Aktivierung von „Early Movers“ unter den Kunden

Die CDR-Branche sollte Nischenkunden mit strengen Qualitätskriterien und einer hohen Zahlungsbereitschaft für frühe, kostenintensive CDR-Projekte identifizieren. Die Einbindung dieser „Early Movers“ kann das Bewusstsein und die Sicherheit für „Second Movers“ erhöhen und so eine breitere Marktakzeptanz fördern. Darüber hinaus könnten Technologieunternehmen wie Microsoft oder andere professionelle Dienstleistungsunternehmen als vielversprechende Vorreiter dienen, um mit dem Aufbau und der Diversifizierung ihrer Zertifikats-Portfolios zu beginnen. Gleichzeitig konzentrieren sich Großemittenten wie die Stahl- oder Automobilindustrie weiterhin zuerst auf Reduktionsmaßnahmen. Die Ansprache von Industrieverbänden wie dem Verband der Automobilindustrie (VDA) kann dazu beitragen, bestimmte Kundengruppen frühzeitig und effektiv anzusprechen. Durch die Vermarktung maßgeschneiderter CDR-Methoden an Käufer, unter anderem basierend auf Standort, Branchenüberschneidung und Zahlungsbereitschaft, können „Early Movers“ weiter ermutigt werden, in CDR-Methoden zu investieren. Das Vertrauen in sich entwickelnde Methoden wie ERW könnte durch strategische Kooperationen zwischen CDR-Unternehmen und Zertifizierungsstellen (z. B. Verra) weiter gestärkt werden, um die Akzeptanz der Methoden durch diese Standards sicherzustellen.

## 5.4 CDR-Käufer

### 11: Umstellung des freiwilligen Portfolios von Vermeidungszertifikaten auf Entnahmezertifikate

CDR-Käufer sollten den Anteil der Vermeidungsgutschriften in ihren Kompensationsportfolios allmählich reduzieren, um die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Entnahmezertifikaten zu signalisieren. Käufer und Verbände können dies fördern, indem sie sich das Ziel setzen, Vermeidungszertifikate jährlich um einen bestimmten Prozentsatz zu reduzieren und sie durch CDR-Zertifikate zu ersetzen. So hat beispielsweise die First Movers Coalition des Weltwirtschaftsforums ein CDR-Ziel für ihre Mitglieder bis 2030 festgelegt, dem andere Verbände folgen könnten.<sup>44</sup> Zu dieser Strategie könnte auch die Hervorhebung von Synergien in der Lieferkette gehören, wie z. B. die Verwendung von Produkten aus CO<sub>2</sub>-Entnahmeprojekten in der Lieferkette (z. B. Biokohle in Baumaterialien wie Beton) durch die Käufer. Darüber hinaus können interne Kohlenstoffpreise, die den CDR-Preisen entsprechen, eine wirksame Maßnahme sein, um Anreize für den Kauf von CDR zu schaffen und diesen zu finanzieren. Durch den Kauf einer Vielzahl von CDR-Zertifikaten, einschließlich solcher aus neuen Technologien, können die Käufer die Marktnachfrage nach hochwertiger CO<sub>2</sub>-Entnahme ankurbeln.

### 12: Abschließen langfristiger Abnahmeverträge und finanzielle Verpflichtungen

Langfristige Abnahmeverträge können ein starkes Nachfragesignal senden und das Lieferantenrisiko mindern. So können Unternehmen beispielsweise vereinbaren, in den nächsten zehn Jahren jährlich eine feste Menge an CDR-Zertifikaten zu kaufen, was den Lieferanten vorhersehbare Einnahmeströme sichert. Vorabverpflichtungen oder Direktinvestitionen in CDR-Projekte können das Wachstum und die Stabilität der Branche weiter fördern, indem sie die Risiken der Lieferanten verringern.

### 13: Förderung der vollen Anrechenbarkeit von CDR-Zertifikaten auf die Klimaziele

CDR-Käufer sollten sich für die Aufnahme von CDR in die Standards für Umwelt-, Sozial- und Governance-Berichterstattung (ESG) und die Festlegung von Zielen einsetzen. Durch die Förderung einer noch stärkeren Akzeptanz und Rolle von CDR-Zertifikaten in freiwilligen Standards wie der Science-Based-Targets-Initiative (SBTi) oder dem Carbon Disclosure Project (CDP) können die Käufer die Nachfrage nach qualitativ hochwertiger CO<sub>2</sub>-Entnahme ankurbeln. Beispielsweise kann die Aufnahme von CDR in die Nachhaltigkeitsberichte und Klimaaktionspläne von Unternehmen deren Bedeutung für Stakeholdergruppen und Investoren signalisieren und so deren Glaubwürdigkeit und Akzeptanz erhöhen.

### 14: Entwicklung starker Kommunikationsstrategien und Einbeziehung der Öffentlichkeit

Das Angebot von Bildungsformaten, um das Bewusstsein für die sozialen und regionalen Vorteile von CDR zu schärfen, und das Lancieren von Kampagnen, die Zusatznutzen wie die biologische Vielfalt und die Vorteile der Kreislaufwirtschaft hervorheben, können ein breiteres Engagement fördern. Strategische PR-Maßnahmen, die starke Nachfragesignale an "Second Mover" senden und Erfolgsgeschichten bestimmter CDR-Methoden präsentieren, können das öffentliche Verständnis und die Unterstützung für CDR-Initiativen verbessern und so eine breitere Akzeptanz fördern. So können beispielsweise Webinare, Pressemitteilungen, Gemeinschaftsveranstaltungen und Partnerschaften mit Industrieverbänden die richtige Zielgruppe effektiv erreichen.

<sup>44</sup> World Economic Forum White Paper, 2024.

## 5.5 Investoren

### **15:** Entwicklung von Projektfinanzierungslösungen zur Schließung der CDR-Finanzierungslücke

Investoren sollten nicht verwässernde Finanzinstrumente schaffen und Fremdkapitalinstrumente für hohe initiale Projektkosten einführen, um Scale-ups mit einem "Nicht-VC"-Renditeprofil zu unterstützen (z. B. Zuschuss- und Kreditprogramme). Mehr Optionen für die Startfinanzierung durch die Einrichtung spezieller CDR-Startkapitalfonds und die Bereitstellung von Kreditverbesserungen für Start-ups können CDR-Projekte lebensfähiger

machen. Darüber hinaus kann die Zusammenarbeit mit Versicherungsunternehmen zum Management von Lieferrisiken und die Annahme verschiedener Garantien, die über reine Vorauszahlungen hinausgehen, die endgültige Investitionsentscheidung (FID) von Projekten ermöglichen. Der Einsatz von Mischfinanzierungsmodellen, bei denen das Risiko zwischen öffentlichen und privaten Investoren aufgeteilt wird, könnte beispielsweise mehr Investitionen in CDR fördern. Diese Maßnahmen können solide Finanzierungsoptionen gewährleisten, Risiken mindern und Investitionen in CDR-Projekte in frühen Phasen fördern.





Die Analyse in diesem Bericht zeigt den dringenden Bedarf an CDR in verschiedenen Klimaszenarien auf und präsentiert eine Vielzahl von Methoden und das erhebliche Potenzial, das CDR weltweit freisetzen kann. Ein gemeinschaftlicher Ansatz, der politische Entscheidungsträger, die gesamte CDR-Branche, CDR-Käufer und Investoren einbezieht, ist entscheidend für die Überwindung bestehender Hürden und die Ausweitung von teilweise neu entstehenden CDR-Methoden.

Durch die Nutzung von technologischem Fachwissen und die Schaffung solider politischer Rahmenbedingungen können Deutschland und Europa das Wachstum einer dynamischen CDR-Branche ankurbeln, die den Klimawandel bekämpft und gleichzeitig das Wirtschaftswachstum und die Entstehung von Arbeitsplätzen fördert. In Zukunft werden entschiedene und konsequente Maßnahmen unabdingbar sein, um das volle Potenzial von CDR zu erschließen und eine nachhaltige Zukunft für kommende Generationen zu gewährleisten.

# Über die Hauptautoren

## Patrick Herhold

Managing Director und Senior Partner, München

Patrick ist Mitbegründer des BCG Center for Climate & Sustainability und leitet den Geschäftsbereich Dekarbonisierungslösungen. Er ist Experte für den Klimawandel und Hebel zur Emissionsminderung, Märkte und Emissionsregulierung sowie damit verbundene Strategien für private und öffentliche Akteure.

[Herhold.Patrick@bcg.com](mailto:Herhold.Patrick@bcg.com)

## Johanna Pütz

Managing Director und Partnerin, Berlin

Johanna leitet den Bereich Klima & Nachhaltigkeit bei BCG in Mitteleuropa. Sie ist spezialisiert auf Dekarbonisierung (inkl. Scope 3), Kreislaufwirtschaft und ESG für Energie- und Industrieunternehmen, insbesondere in der Automobil- und Rohstoffindustrie, und verfügt über umfangreiche Erfahrung mit Kohlenstoffmärkten.

[Puetz.Johanna@bcg.com](mailto:Puetz.Johanna@bcg.com)

## Karan Mistry

Managing Director und Partner, Los Angeles

Als leitendes Mitglied des BCG-Teams für Klima & Nachhaltigkeit konzentriert sich Karan auf Dekarbonisierung und Klimatechnologien, insbesondere in den Bereichen Energie und öffentlicher Sektor. Er ist Experte für CO<sub>2</sub>-freie Energiebeschaffung und CO<sub>2</sub>-Entnahme.

[Mistry.Karan@bcg.com](mailto:Mistry.Karan@bcg.com)

## Robin Biergan

Projektleiter, München

Robin ist ein Kernmitglied des BCG-Teams für Klima & Nachhaltigkeit. Er hat Dekarbonisierungs- und Sourcingstrategien im CDR-Bereich entwickelt. Darüber hinaus hat er Transformations- und Investitionsprogramme im Industriegüter- und Energiesektor unterstützt.

[Bierganz.Robin@bcg.com](mailto:Bierganz.Robin@bcg.com)

## Phillip Spiekermann

Berater, München

Phillip hat Erfahrung in verschiedenen Klima- und Nachhaltigkeitsthemen, insbesondere in den Bereichen Konsumgüter und Industriegüter. Er hat an einer Vielzahl von Projekten gearbeitet, die vom Aufbau von Elektrofahrzeug-OEMs bis zur nachhaltigen Beschaffung in der Modebranche reichen.

## Louisa Maier

Beraterin, München

Louisa ist auf Strategie- und Geschäftsentwicklung spezialisiert, mit Schwerpunkt auf ESG-gesteuerten organisatorischen Veränderungen und Wachstumsstrategien. Sie hat Projekte in verschiedenen Sektoren begleitet, darunter Private Equity, Konsum- und Industriegüter.



# Glossar

Abkürzung	Begriff
°C	Grad Celcius
A/R	Aufforstung / Wiederaufforstung
BCR	Biochar Carbon Removal
BECCS	Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BPU	Biokohle-Produktionsanlage
CAPEX	Investitionsausgaben
CCS	CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung an Punktquellen
CDR	CO <sub>2</sub> -Entnahme (Carbon Dioxide Removal)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> e	Kohlendioxid-Äquivalent
CORSIA	Kohlenstoffkompensations- und Reduktionsprogramm für die internationale Zivilluftfahrt
CRCF	Carbon Removal Certification Framework
DAC	Direkte CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Luft
DACCS	Direkte CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung aus der Luft
DE	Deutschland
DVNE	Deutscher Verband für Negative Emissionen
ERW	Beschleunigte (Gesteins-)Verwitterung
ESG	Umwelt, Soziales und Governance
ESRS	Europäische Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung
EU-ETS	Emissionshandelssystem der Europäischen Union
FID	Endgültige Investitionsentscheidung
GCD	Green Claims Directive
THG	Treibhausgasemissionen
IEA	International Energy Agency
IFM	Verbesserte Forstwirtschaft
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSpG	Kohlendioxid-Speicherungsgesetz
LNe	Langfriststrategie Negativemissionen
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MRV	Messung, Berichterstattung und Überprüfung
NDC	National festgelegter Beitrag
p.a.	Per annum / pro Jahr
PV	Photovoltaik
SBTi	Science Based Targets initiative
SFDR	Verordnung über nachhaltigkeitsbezogene Offenlegungspflichten
TRL	(Technischer) Reifegrad
VC	Risikokapital
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
WACCS	Thermische Abfallbehandlung mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung



## Haftungsausschluss

Diese Studie wurde vom Deutschen Verband für Negative Emissionen (DVNE) in Auftrag gegeben und gemeinsam von BCG, DVNE und einer Auswahl der dem DVNE angeschlossenen Mitgliedsunternehmen durchgeführt (siehe Autoren und Danksagungen). Die hier dargestellten Ergebnisse, Interpretationen und Schlussfolgerungen sind das Resultat eines gemeinschaftlichen Prozesses. Während Vertreter dieser Unternehmen im Rahmen der Projekt- und Modellierungsarbeiten für diese Studie befragt wurden und Beiträge zu technischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Aspekten des CDR-Marktes und spezifischer CDR-Methoden geliefert haben, stellen die Ergebnisse dieses Berichts die Ansichten der Autoren dar, die durch Primär- und Sekundärforschung gestützt werden. Sie repräsentieren nicht notwendigerweise die Ansichten aller DVNE-Mitglieder, Partner oder anderer Stakeholder.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass BCG selbst zwar CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikate erwirbt, die Autoren dieses Berichts jedoch nicht an den Beschaffungsentscheidungen von BCG beteiligt waren.



BCG

[bcg.com](https://bcg.com)

