



Bewertungsrahmen für marine CO₂- Entnahme und Synthese des aktuellen Wissenstandes

Unified ASsessment framework for proposed methods of MARine CDR and interim
knowledge SYNthesiS (ASMASYS)

AP3: Bewertung der marinen CDR-Methoden und Interim-Synthese

Juli 2024



Impressum

Herausgeber:

Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)
Seestraße 15
18119 Rostock

Leitender Autor:

Dr. Matthias Kreuzburg, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW),
Matthias.Kreuzburg@io-warnemuende.de

In Zusammenarbeit mit:

Hendrikje Wehnert, Dr. Teresa Morganti, Prof. Dr. Gregor Rehder (IOW – Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde)

Dr. Christine Merk, Dr. Lena Bednarz (IfW – Kiel Institut für Weltwirtschaft)

Prof. Dr. Christian Baatz, Dr. Lukas Tank (CAU – Kiel Universität, Philosophisches Seminar und Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht (WSI))

Dr. Wanxuan Yao (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Dr. Miranda Böttcher (Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit (SWP), EU/Europe Research Division)

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von ASMASYS (Projektnummer 03F0898A), einem der sechs Forschungsverbände der Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“.

Zitierweise:

Kreuzburg, M., Baatz, C., Bednarz, L., Böttcher, M., Merk, C., Morganti, T., Tank, L., Yao, W., Wehnert, H., Rehder, G., (2024). Unified Assessment framework for proposed methods of Marine CDR and interim knowledge Synthesis, ASMASYS, Rostock, DOI 10.3289/CDRmare.38

1. Einleitung	4
2. Aktueller Rechtsrahmen und künftige Ausrichtung für mCS und mCDR in Deutschland	6
3. Öffentliche Wahrnehmung von mCDR/mCS-Technologien	8
4. Project ASMASYS	9
4.1 Wissenschaftliche Ziele und Bezug zur Förderungspolitik.....	9
4.2 Der ASMASYS Bewertungsrahmen	9
4.3 Die sieben Leitfragen (Dimensionen) des Bewertungsrahmens	10
4.4 Konzeptnachweis mit hypothetischen Testfällen	11
4.5 Die 10 Mio. Tonnen CO ₂ -Entnahme pro Jahr – Herausforderung für Deutschland.....	13
5. Operationelle Anwendbarkeit und Potential der Leitfragen des Bewertungsrahmens	13
6. Erforschung der marinen Kohlendioxid-Entnahme in Deutschland	17
6.1 Erhöhung der Alkalinität im Ozean.....	17
Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie.....	17
Öffentliche Debatten und Wahrnehmungen	18
Bewertung nach Dimensionen.....	19
6.2 Akkumulation von blauem Kohlenstoff in marinen Ökosystemen	20
Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie.....	20
Öffentliche Debatten und Wahrnehmungen	21
Bewertung nach Dimensionen.....	22
7. Erforschung der marinen Kohlenstoffspeicherung in Deutschland	23
7.1 mCS in der Tiefseekruste	23
Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie.....	23
Öffentliche Debatte und Wahrnehmungen	24
7.2 mCS – submarine Speicherung in geologischen Formationen.....	25
Öffentliche Debatte und Wahrnehmungen	26
Bewertung nach Dimensionen.....	27
8. Zusammenfassung	29
9. Danksagung	31
10. Glossar	31
12. Referenzen	33
13. Anhang: Indikatoren und Kriterien (englisch)	38

1. Einleitung

Als Unterzeichner des Pariser Abkommens COP 21 haben die Regierungen weltweit die Notwendigkeit anerkannt, den anthropogenen Klimawandel einzudämmen, indem sie sich verpflichtet haben, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und eine Begrenzung auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau anzustreben (IPCC, 2018). Die durch die Klimakrise verursachten signifikanten und raschen Veränderungen des Klimas auf der Erde sind in erster Linie auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen, insbesondere auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Abholzung von Wäldern und industrielle Prozesse, die Treibhausgase (THG) in die Atmosphäre freisetzen. Diese THG, wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), halten die Sonnenwärme in der Atmosphäre zurück, was zu einer globalen Erwärmung und Veränderungen der Wettermuster führt. Die Folgen der globalen Erwärmung sind regional steigende Temperaturen, die zu häufigeren und intensiveren Hitzewellen führen, das Abschmelzen von Eiskappen und Gletschern, der Anstieg des Meeresspiegels, extreme Wetterereignisse, die Störung von Ökosystemen und Auswirkungen auf die Landwirtschaft und Ernährungssicherheit, zum Beispiel durch Ernteaufschläge. Daher ist es dringend erforderlich, den Klimawandel einzudämmen.

Der Sonderbericht des Zwischenstaatliche Sachverständigenrat für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) über die globale Erwärmung betont, dass alle Möglichkeiten zur Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C den Einsatz von Technologien zur Entnahme von Kohlendioxid (Carbon Dioxide Removal, CDR) zusätzlich zu den unmittelbaren Emissionsreduktionen erfordern (IPCC, 2018). Außerdem müsse CDR in erheblichem Umfang eingesetzt werden (100-1.000 Gt CO₂ im Laufe des 21. Jahrhunderts). Selbst bei einer Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C ist bei praktisch allen Szenarien auch der Einsatz von CDR erforderlich. Aktuelle Szenarien, wie die des IPCC, konzentrieren sich bisher ausschließlich auf landbasierte CDR-Methoden. Das Erreichen der Klimaschutzziele mit landbasierten CDR-Methoden allein wird jedoch eine große Herausforderung, wenn nicht gar unmöglich sein (Smith et al. 2015; Boysen et al. 2017). Das Wissen darüber, wie die Meere zu den notwendigen Netto-Null-Strategien beitragen könnten, ist begrenzt, obwohl sie 70 % der Erdoberfläche bedecken und als größte langfristige Senke für anthropogenes CO₂ fungieren, was das immense Potenzial für CDR-Anwendungen im Meeresbereich verdeutlicht. Darüber hinaus ergänzen verbesserte ozeanbasierte Maßnahmen zur Kohlenstoffbindung die Maßnahmen an Land und umfassen Strategien, welche die natürlichen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse des Ozeans zur CO₂-Bindung verbessern (Keller et al. 2018).

Der Forschungsmission [CDRmare](#) der [Deutschen Allianz Meeresforschung \(DAM\)](#) besteht aus sechs Projekt-Konsortien. Sie untersuchen verschiedene Methoden der marinen CO₂-Entnahme und -Speicherung sowie das Ausmaß, in dem die Meere eine bedeutende Rolle bei der Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre spielen können. Diese Methoden werden innerhalb des transdisziplinären Rahmens von [ASMASYS](#) auf ihr Potenzial, ihre Risiken und ihre Kompromisse hin bewertet. Das Potenzial, die Durchführbarkeit und die Auswirkungen verschiedener Methoden zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre durch Erhöhung der Alkalinität des Ozeans (Ocean Alkalinity Enhancement, OAE) wurde vom [RETAKE](#)-Konsortium untersucht. OAE senkt den Partialdruck von CO₂ im Meerwasser, wodurch der Nettofluss von CO₂ aus der Atmosphäre in den Ozean erhöht und die atmosphärische CO₂-Konzentration verringert wird. RETAKE untersucht verschiedene mineralische Alkalinitätsquellen und analysiert ihre Auflösungskinetik, ihr CO₂-Entnahmepotenzial sowie ihre chemischen und biologischen Nebeneffekte. Im Rahmen des Konsortiums [sea4soCiety](#) wurde untersucht, wie die Kohlenstoffspeicherkapazität verschiedener Küstenökosysteme (blauer Kohlenstoff) erhöht werden kann, indem der Rückgang ihrer Wirksamkeit als natürliche Kohlenstoffsenken umgekehrt wird. Das Konsortium analysiert Lebensraumeigenschaften, wie die Biomasse der Vegetation und die Ablagerung von organischem Material in Meeressedimenten, in verschiedenen Küstenregionen, um geeignete Gebiete für die Ausweitung von Ökosystemen zu ermitteln. Der künstliche Auftrieb von Meerwasser, der die Primärproduktivität erhöhen soll, wird auf sein Potenzial zur CO₂-Bindung untersucht. [Test-ArtUp](#) untersuchte diese Methode mit einem

transdisziplinären Ansatz und bewertet die technische Anwendung, die Umweltauswirkungen und die Voraussetzungen an die Regierung, um Empfehlungen für die Umsetzung zu geben und einen Beitrag zu den Zielen der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung zu leisten.

Mit der Überarbeitung des [Bundes-Klimaschutzgesetzes](#) will die Bundesregierung die Klimaregulierung verstärken, indem sie sich gesetzlich verpflichtet, bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität zu erreichen, mit dem Ziel, die Emissionen bis 2030 auf 65 Prozent des Niveaus von 1990 zu senken. Um seine Emissionsziele zu erreichen, muss Deutschland seine Emissionen (etwa 746 Mio. t CO₂-Äquivalent im Jahr 2022) bis 2045 reduzieren. Trotz maximaler Anstrengungen zur Emissionsvermeidung wird davon ausgegangen, dass die verbleibenden CO₂-Emissionen bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts andauern werden, wobei Unsicherheiten über ihr Ausmaß und die zulässigen Sektoren bestehen. Schätzungen gehen davon aus, dass Deutschland bei optimistischen Emissionsvermeidungsszenarien mit Restemissionen von 32 bis 60 Millionen Tonnen CO₂ jährlich konfrontiert sein könnte (Borchers et al. 2024). Unvermeidbar sind Rest-CO₂-Emissionen derzeit in der Zement- und Stahlproduktion, im Transportgewerbe (Luft-, Transport- und Schwerlastverkehr), in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung (Buck et al. 2023, Marmier 2023). Ein weiterer innovativer Ansatz zur Verringerung dieser Emissionen ist die marine Kohlenstoffspeicherung (englisch: marine Carbon Storage, mCS) in tiefen geologischen Formationen (z.B. Sandsteinformationen unter der Nordsee, siehe Projekt-Konsortium [GEOSTOR](#)) oder in basaltischer Tiefseekruste (siehe Projekt-Konsortium [AIMS](#)³), die die Injektion von an Land gewonnenen CO₂ in poröses Gestein unter dem Meeresboden beinhaltet (Zhao et al. 2024). Der Meeresboden, insbesondere Sandstein und Basaltkruste, bietet eine beträchtliche CO₂-Speicherkapazität, die aufgrund zusätzlicher Mineralisierung als sicherer und dauerhafter gilt als herkömmliche Methoden (Bachu, Gunter und Perkins 1994; McGrail et al. 2017). Ein Beispiel für diesen Ansatz ist die Sleipner-Formation in der Nordsee, die Statoil seit 1996 betreibt und in der rund 1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr gespeichert werden. Mit dieser Methode wird eine Kosteneffizienz von weniger als 50 €/t CO₂ erreicht, indem erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten wiederverwendet und die bestehende Infrastruktur genutzt wird.

Angesichts des dringenden Bedarfs an Forschung über die Fähigkeit der Meere, CO₂ aus der Atmosphäre zu speichern, zu absorbieren und zu binden, muss unbedingt betont werden, wie wichtig es ist, nicht-naturwissenschaftliche Überlegungen in alle Technologien zur Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid im Meer einzubeziehen. Dazu gehört auch die Berücksichtigung rechtlicher, sozialer und ethischer Aspekte sowie die sorgfältige Beachtung politischer Rahmenbedingungen und inhärenter politischer Steuerungsmechanismen.

Eines der Hauptziele des Projekt-Konsortiums [ASMASYS](#) ist es, einen umfassenden Bewertungsrahmen für die Optionen der marinen Kohlendioxid-Entnahme (mCDR) und der marinen Kohlenstoffspeicherung (mCS) zu schaffen, der als Grundlage für die einheitliche Bewertung verschiedener Methoden dient. Dies ist aus mehreren Gründen wichtig: Die Meeresumwelt bietet zwar ein enormes Potenzial für mCDR- und mCS-Initiativen zur Entnahme und Speicherung erheblicher Mengen CO₂ aus der Atmosphäre, doch sind diese Methoden auch mit einzigartigen Herausforderungen und Risiken verbunden, insbesondere in Bezug auf die Umweltauswirkungen und die Einhaltung von Vorschriften. Durch die Schaffung eines umfassenden Bewertungsrahmens können politische Entscheidungsträger:innen, Wissenschaftler:innen und Interessengruppen die Durchführbarkeit, die Wirksamkeit sowie die ökologischen und ethischen Auswirkungen von mCDR/mCS-Methoden bewerten und beurteilen. Darüber hinaus bietet ein solcher Bewertungsrahmen einen strukturierten Ansatz für die Entscheidungsfindung und stellt sicher, dass die vorgeschlagenen Initiativen mit den Zielen der ökologischen Nachhaltigkeit und den gesellschaftlichen Werten in Einklang stehen. Ein standardisierter Bewertungsprozess fördert Transparenz, Rechenschaftspflicht und das Vertrauen der Öffentlichkeit in mCDR/mCS-Initiativen und erleichtert einen sachkundigen Dialog unter Einbeziehung von Interessengruppen. Insgesamt ist die Schaffung eines Bewertungsrahmens von entscheidender Bedeutung für die verantwortungsvolle Entwicklung und Umsetzung von mCDR- und mCS-Methoden, wobei eine Abwägung zwischen den potenziellen Vorteilen und der Notwendigkeit, ökologische und soziale Risiken zu minimieren, ermöglicht werden muss.

2. Aktueller Rechtsrahmen und künftige Ausrichtung für mCS und mCDR in Deutschland

Gegenwärtig sind sowohl die Speicherung von Kohlenstoffdioxid unter dem Meeresboden als auch die meisten marinen Verfahren zur Entnahme von Kohlenstoffdioxid nach deutschem Recht eingeschränkt oder verboten ([KSpG](#), [HSEG](#)). Dies scheint sich jedoch zu ändern, wie das BMWK, und die derzeitige Regierung in den kürzlich veröffentlichten „Eckpunkten“ sowohl für eine Carbon Management-Strategie (CMS) als auch für eine Langfriststrategie für negative Emissionen ([Kabinett macht Weg frei für CCS in Deutschland \(PR: 29/05/2024\)](#); [Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management- Strategie; Langfriststrategie für negative Emissionen \(BMWK, 26/02/2024\)](#)) verlauten ließ.

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt bis 2045 eines der ersten großen klimaneutralen Industrieländer zu werden. Um dies zu erreichen, hat die Regierung in den vergangenen zwei Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen. Dazu gehören der Ausbau der erneuerbaren Energien, die Dekarbonisierung der Industrie, der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft, die Förderung der E-Mobilität, die Stärkung des Emissionshandels, die Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie die Förderung der Wärmewende im Gebäudebereich (15.03.2024 – PRESSEMITTEILUNG – [Deutschland bei Klimazielen 2030 erstmals auf Kurs](#)). Das übergeordnete Ziel ist die Vermeidung von Treibhausgasemissionen, wobei die Dekarbonisierung im Mittelpunkt des Klimaschutzes steht. Dazu gehört der Ausstieg aus der Kohle und den fossilen Energieträgern ([Kohleausstiegsgesetz](#)). Der derzeitige wissenschaftliche Konsens und die jüngsten Berichte, einschließlich der des IPCC, weisen darauf hin, dass das Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 den Einsatz von Technologien zur Kohlenstoff-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung (CCS/CCU) erfordert (Lee et al. 2023). Der Grund dafür ist, dass bestimmte Emissionen auf andere Weise nur schwer oder gar nicht zu vermeiden sind. Diese Sektoren stehen aufgrund der steigenden Preise für europäische Emissionszertifikate unter zunehmendem Kostendruck. Die Bundesregierung wird die Grundlagen für den Einsatz von CCS/CCU-Technologien, einschließlich CO₂-Transport und -Speicherung, durch Umsetzung einer umfassende [Industrielle CO₂-Management Strategie \(Industrial Carbon Management, ICM\)](#) durch die EU schaffen.

Nach einem ausführlichen Dialog mit Interessengruppen aus der Zivilgesellschaft, der Wissenschaft und der Industrie hat die Regierung Eckpunkte für diese Strategie festgelegt, die in naher Zukunft umfassender erläutert werden sollen. Auf internationaler Ebene machen die CCS/CCU-Technologien rasche Fortschritte. Mehrere europäische Länder sowie die USA entwickeln Projekte zur geologischen Speicherung. Auch die Europäische Kommission fördert diese Technologien durch das [Netto-Null-Industrie-Gesetz: Beschleunigung des Übergangs zur Klimaneutralität \(NZIA\)](#) und die [ICM-Strategie](#). Um das Klimaneutralitätsziel bis 2045 zu erreichen, müssen die derzeitigen Hürden für die Anwendung von CCS/CCU in Deutschland beseitigt werden. Die Regierung wird den Einsatz dieser Technologien im Einklang mit den Zielen des deutschen Klimaschutzgesetzes ([KSG](#)) fördern.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien wird fortgesetzt, unterstützt durch den Bau neuer Gaskraftwerke, die auf Wasserstoff umgestellt werden sollen. CCS/CCU-Anwendungen in Kohlekraftwerken werden nicht zugelassen, und die Nutzung von CO₂-Pipelines für Kohleemissionen ist ausgeschlossen. Die staatliche Förderung von CCS/CCU wird sich auf schwer zu vermeidende Emissionen konzentrieren. Das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz ([KSpG](#)) wird aktualisiert, um den Bau von CO₂-Pipelines in einem geregelten Rahmen zu ermöglichen und Rechtsunsicherheiten zu beseitigen. Deutschland wird die Änderung des [Londoner Protokolls](#) ratifizieren, um CO₂-Exporte für die Offshore-Speicherung zu ermöglichen, und die einschlägigen nationalen Gesetze entsprechend ändern ([Kabinett macht Weg frei für CCS in Deutschland \(PR: 29/05/2024\)](#)). Die Erkundung von Offshore-Speicherstätten in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) und auf dem Festlandsockel Deutschlands wird rechtlich ermöglicht, wobei die Speicherung bei nachgewiesener Eignung des Standorts erlaubt ist, Meeresschutzgebiete ausgenommen. Die dauerhafte Speicherung von CO₂ auf deutschem Festland bleibt verboten, es sei denn, einzelne Bundesländer entscheiden sich aufgrund

besonderer gesetzlicher Bestimmungen dafür. Die ICM-Strategie wird die [Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen \(LNe; BMWK, 26.02.2024\)](#) ergänzen, die sich auf unvermeidbare Restemissionen und deren Ausgleich durch Technologien wie Direct Air Capture and Storage (DACCS) und Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) konzentriert. Die Deutsche Energie-Agentur ([dena](#)) erkennt die derzeitige rechtliche Unmöglichkeit der CO₂-Speicherung im Inland aufgrund des KSpG an und plädiert für eine nationale Speicherinfrastruktur, wobei sie Vorteile wie kürzere Transportwege und geringere Kosten hervorhebt.

Um die Klimaziele zu erreichen, empfiehlt die [dena](#), kurzfristig CO₂-Exporte zu internationalen Speicherstätten zuzulassen und gesetzliche Anpassungen vorzunehmen, um die Abscheidung und Nutzung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Utilization – CCU) in der chemischen Industrie zu unterstützen. Die [dena](#) betont, dass CCS auf unvermeidbare Emissionen beschränkt werden soll und die Emissionsreduzierung durch erneuerbare Energien und Effizienzsteigerungen Vorrang haben soll. Diese Technologien erfordern eine CO₂-Infrastruktur und -Speicherung, die in der Strategie behandelt werden. Die nationale Biomassestrategie wird angesichts der begrenzten Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse auch BECCS in Betracht ziehen. Die Anwendung von CCS/CCU wird Teil eines breiteren Mixes von Instrumenten und Technologien zur Dekarbonisierung sein, insbesondere in den Sektoren Industrie und Abfallwirtschaft. Bei Prozessemissionen, wie z. B. bei der Zement- und Kalkherstellung, ist CCS/CCU für das Erreichen der Klimaneutralität unerlässlich. Die Technologie wird auch für den Abfallbehandlungssektor von entscheidender Bedeutung sein, wo Emissionen derzeit unvermeidbar sind. Während bei der Stromerzeugung der Schwerpunkt weiterhin auf dem Ausbau der erneuerbaren Energien liegt, wird CCS/CCU für Gaskraftwerke und die Nutzung von Biomasse erlaubt sein. Die Regierung erkennt an, dass das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) bereits Anreize für CCS/CCU bietet, indem es die Anrechnung von abgeschiedenem CO₂ ermöglicht. Die jüngsten Reformen des EU-Emissionshandelssystems erleichtern auch die Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur. Zusätzliche staatliche Unterstützung wird jedoch erforderlich sein, um die höheren Kosten der klimaneutralen Produktion in Branchen wie Zement und Kalk zu decken. Die Strategie umfasst die Förderung einer privaten Pipeline-Infrastruktur für den CO₂-Transport, die entscheidend für die Integration in den europäischen Rahmen für das Kohlenstoffmanagement ist. Deutschland wird seinen Rechtsrahmen anpassen, um die Entwicklung dieser Infrastruktur zu unterstützen und die derzeitigen rechtlichen Hindernisse zu beseitigen. Der Offshore-Speicherung wird aufgrund ihrer nachgewiesenen Sicherheit und der potenziellen Kostenvorteile durch die Nähe zur deutschen Küste Vorrang eingeräumt.

Insgesamt hat das deutsche Bundeskabinett dem CMS zugestimmt, um die kommerzielle Speicherung von nicht vermeidbarem CO₂ für die industrielle Nutzung zu ermöglichen und dabei ökologische Kriterien und hohe Sicherheitsstandards zu gewährleisten. Dies beinhaltet eine Aktualisierung des Rechtsrahmens, um die Erkundung und Entwicklung von Offshore-Speichern zu unterstützen, wobei Meeresschutzgebiete ausgenommen wurden. Die Onshore-Speicherung wird weiterhin beschränkt bleiben, mit möglichen Opt-in-Bestimmungen für Bundesländer. Die Strategie stellt den verantwortungsvollen Umgang mit CO₂-Emissionen sicher, integriert Speicherlösungen in eine umfassende marine Raumplanung und fördert die Zusammenarbeit innerhalb der Europäischen Union für Kohlenstoffmanagement und -speicherung ([Kabinett macht Weg frei für CCS in Deutschland \(PR: 29/05/2024\)](#)). Im Februar 2024 veröffentlichte das BMWK ein weiteres Dokument, in dem die Eckpunkte der geplanten [Langzeitstrategie für negative Emissionen](#) skizziert werden ([BMWK, 26.02.2024](#)), die auch Hinweise auf marine und landbasierte CDR-Ansätze enthält. Aufbauend auf den Erkenntnissen der BMBF-Forschungsprogramme [CDRmare](#) und [CDRterra](#) wird sich die LNe voraussichtlich auf Schlüsselaspekte konzentrieren wie: Gesellschaftliche Wahrnehmungen, um die öffentliche Akzeptanz der CO₂-Abscheidung in Deutschland zu bewerten, Chancen und Risiken zu identifizieren und effektive Lösungen vorzuschlagen. Maßnahmen zur Prüfung von Regelungen, die das Potenzial für negative Emissionen erschließen und gleichzeitig sicherstellen, dass alle Technologien das Vorsorgeprinzip einhalten, um unverantwortliche Risiken zu vermeiden, sind:

- Forschung und Entwicklung zur Fortsetzung der Grundlagen- und angewandten Forschung, einschließlich Feldexperimenten zur Übertragung von Laborergebnissen auf Feldversuche, um praktische Erkenntnisse zu gewinnen.
- Erweiterung des Hohe-See-Einbringungsgesetzes (HSEG), um die Ausnahmeregelungen auf die Erhöhung der Alkalinität der Ozeane und die CO₂-Mineralisierung in der ozeanischen Erdkruste auszuweiten.
- Integration mit bestehenden Politiken, um eine Abstimmung mit der CMS und natürlichen Klimaschutzmethoden zu gewährleisten.
- Umfassende Evaluierung zur Entwicklung von Methoden für Lebenszyklusanalysen, um verschiedene Ansätze zu bewerten, einschließlich ihrer Zusatznutzen und Kompromisse.
- Interdisziplinäre Forschung, um disziplinübergreifende Fragen im Zusammenhang mit der öffentlichen Akzeptanz zu klären, um gesellschaftliche Einstellungen und geeignete Anreizsysteme zu untersuchen. Regulatorische und politische Rahmenbedingungen, um Wechselwirkungen mit anderen Nachhaltigkeitszielen zu verstehen.
- Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung (Monitoring, Reporting and Verification – MRV) zur Verbesserung der Methoden für eine genaue Verfolgung und Bewertung.

Es muss berücksichtigt werden, dass dieser Synthese Bericht einen Zwischenstand darstellt und dass es ein langer Dialog- und politischer Prozess sein wird, bevor die endgültige Strategie entwickelt und angenommen wird. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die regulatorische Landschaft für mCS und mCDR in Deutschland derzeit verändert und in Zukunft wohl noch mehr Zulässigkeit erfahren wird.

3. Öffentliche Wahrnehmung von mCDR/mCS-Technologien

Die öffentliche Akzeptanz gilt als eines der größten Hindernisse für den Einsatz von CDR-Technologien (Fuss et al. 2014; Rogelj et al. 2018; Rickels et al. 2019). In einer Befragung von Experten aus der Erdsystemmodellierung und der integrierten Bewertung wurde die politische und öffentliche Akzeptanz als größte Einschränkung für die Durchführbarkeit der Eisendüngung des Ozeans, der Erhöhung der Alkalinität (OAE) und des künstlichen Auftriebs angesehen. Die Kosteneffizienz wurde dabei als nächstgrößere Sorge genannt. Umgekehrt betrachteten sie die öffentliche Akzeptanz als eine geringere Einschränkung für das Management von blauem Kohlenstoff (Rickels et al. 2019). Es gab immer wieder öffentliche und umweltpolitische Proteste gegen mCDR-Forschungsprojekte zur Eisendüngung wie LOHAFEX im Südpolarmeer (Schiermeier 2009) oder die Haida Salmon Restoration Corporation in internationalen Gewässern vor der kanadischen Westküste (Gannon und Hulme 2018), Projekte zur CO₂-Injektion in die Tiefsee vor Hawaii und Norwegen (de Figueiredo, Reiner und Herzog 2003) oder zuletzt Proteste gegen ein Projekt zur Ozeanalkalisierung in Cornwall ([The Guardian 2024](#)). Diese Fälle verdeutlichen den erheblichen gesellschaftlichen Widerstand gegen die künftige Erforschung und Anwendung einiger mCDR/mCS-Methoden. Frühe Forschungsarbeiten konzentrierten sich in erster Linie auf die öffentliche Wahrnehmung von Ozeandüngung und direkter CO₂-Injektion (Bertram und Merk 2020). Erst in jüngster Zeit wurden Studien zu neueren Vorschlägen wie künstlichem Auftrieb, Biomasse-Einbringung oder Erhöhung der Alkalinität des Ozeans durchgeführt (Nawaz et al. 2023; Andersen, Merk und Tvinnereim 2023).

Im Vergleich zu Technologien zur Emissionsminderung wie erneuerbare Energien und Energieeffizienz wurden die Ozeandüngung und die CO₂-Injektion negativ bewertet (Palmgren et al. 2004). Die Wahrnehmung von Technologien wie Kohlenstoff-Abscheidung und -Speicherung (CCS) und

landseitiger CDR wird durch die Wahrnehmung von Eigenschaften wie Natürlichkeit, Kontrollierbarkeit, Speicherdauer, Umweltauswirkungen und Risiken beeinflusst (Palmgren et al. 2004; Amelung und Funke 2015; Bertram und Merk 2020; Cox et al. 2020; Lueck et al. 2024). Der Widerstand lokaler Gemeinschaften kann die Einsatzfähigkeit von mCDR stark einschränken (Myatt, Scrimshaw und Lester 2003; West 2010; Gannon und Hulme 2018; Bertram und Merk 2020). Forschungslücken bestehen vor allem beim Verständnis des Verhältnisses zwischen lokalen und globalen Auswirkungen von mCDR, da die Auswirkungen auf lokale Populationen und Ökosysteme sowie potenzielle überregionale oder globale Wechselwirkungen ungewiss sind.

4. Project ASMASYS

4.1 Wissenschaftliche Ziele und Bezug zur Förderungspolitik

Das Hauptziel des Projekts ASMASYS (Unified ASsessment framework for proposed methods of MARine CDR and interim knowledge SYNthesiS) ist es, die derzeit vorgeschlagenen marinen Methoden zur CO₂-Entnahme (mCDR) und -Speicherung (mCS) anhand eines standardisierten, transdisziplinären Bewertungsrahmens zu beurteilen. Dies beinhaltet im Einzelnen:

- Durchführung der notwendigen transdisziplinären Grundlagenforschung zur Entwicklung eines integrativen Bewertungsrahmens für mCDR-Optionen, in engem Austausch mit den Aktivitäten der CDR-Förderlinie;
- eine interdisziplinäre Bewertung einzelner mCDR-Optionen, einschließlich der in den anderen geförderten Konsortien der Mission untersuchten Methoden, sowie anderer weniger untersuchter mCDR-Optionen, die im Rahmen von ASMASYS auf der Grundlage von Literatur und Austausch mit Experten in Betracht gezogen werden;
- Bereitstellung von transdisziplinärem wissenschaftlichen Input für maßgeschneidertes Stakeholder-Feedback, mit besonderem Fokus auf die deutschen nationalen mCDR-Interessen und -Strategien.
- Entwicklung umfassender Machbarkeits- und Erwünschtheitsleitfragen innerhalb des Rahmens als Instrumente zur Bewertung von mCDR- und mCS-Optionen.

4.2 Der ASMASYS Bewertungsrahmen

Der Bewertungsrahmen besteht aus einem strukturierten Satz von Kriterien und zugrunde liegendem Indikatorenpool, die in sieben Bewertungsleitfragen (Dimensionen) gegliedert sind. Diese Dimensionen bilden die Grundlage für zwei übergreifende Bewertungsfragen: die eine bezieht sich auf die „**Machbarkeit**“ (Was können wir tun?) der bewerteten mCDR-Optionen und die andere auf ihre „**Erwünschtheit**“ (Was sollten wir tun?/Was wäre gut oder schlecht zu tun?). Ziel ist es, die Nutzer bei der Entscheidung zu unterstützen, welche mCDR-Optionen umsetzbar sind und welche Priorität haben sollten. Derzeitige Bewertungsrahmen konzentrieren sich häufig auf bestimmte Bereiche, wie z. B. die Auswirkungen auf die biologische Vielfalt, sind unklar in Bezug auf ihre Bewertungsziele oder bewerten in erster Linie die Machbarkeit und berücksichtigen nur implizit andere Faktoren, wie z. B. die Gerechtigkeit. Gerechtigkeitsüberlegungen sind zwar wichtig, haben aber nicht immer direkten Einfluss auf die Durchführbarkeit. In einer Welt, die von strukturellen Ungleichheiten geprägt ist, sind politische Maßnahmen, die die Kriterien der Gerechtigkeit erfüllen, nicht unbedingt auch die durchführbarsten. Durch das Zusammentragen entscheidender Fragen in Bezug auf Durchführbarkeit und Erwünschtheit bietet der Rahmen vorgeschlagene Kriterien und Indikatoren für die Bewertung. Eine ausführliche Beschreibung wird in Baatz et al. (in Vorbereitung) gegeben.

4.3 Die sieben Leitfragen (Dimensionen) des Bewertungsrahmens

Die Bewertung von mCDR-Optionen umfasst drei Dimensionen der Machbarkeit und vier Dimensionen der Erwünschtheit. Wir nehmen keine Wertung der Wichtigkeit der einzelnen Dimensionen vor. Jede Dimension umfasst drei bis fünf Kriterien zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer mCDR-Option. Jedem Kriterium sind mehrere Indikatoren zugeordnet, anhand derer beurteilt wird, ob und in welchem Umfang die Kriterien erfüllt sind. Diese Indikatoren, ob quantitativ oder qualitativ, bilden die empirische Grundlage des Bewertungsprozesses:

Die **technisch-ökologische Machbarkeit** befasst sich mit der grundlegenden Frage, ob sowohl die technischen Mittel als auch die Umweltbedingungen vorhanden sind, die für die Umsetzung einer bestimmten mCDR-Option erforderlich sind, und stellt die Schlüsselfragen: Ist eine geeignete Infrastruktur und Technologie verfügbar? Lässt die Umwelt die Option zu?

Bei der **politischen Machbarkeit** geht es darum, ob eine bestimmte mCDR-Option in demokratischen Systemen ausreichend Unterstützung findet oder zumindest erheblicher Widerstand von gewählten Vertreter:innen und der Öffentlichkeit vermieden werden kann (Ist die Option politisch möglich?). Faktoren wie politische Anfechtung, Kohärenz mit der bestehenden Klimapolitik und das Vorhandensein politischer Instrumente, die Transparenz und Rechenschaftspflicht gewährleisten, beeinflussen die politische Durchführbarkeit von mCDR-Maßnahmen.

Die **rechtliche Machbarkeit** bewertet, ob die Umsetzung einer mCDR-Maßnahme mit den aktuellen rechtlichen Anforderungen übereinstimmt (Ist die Option rechtlich zulässig?), wobei ein abstrakter Ansatz gewählt wird, um zukünftige rechtliche Änderungen zu berücksichtigen. Sie konzentriert sich auf fünf Schlüsselbereiche, die typischerweise in Vorschriften für gefährliche Handlungen zu finden sind, und gewährleistet die Anpassungsfähigkeit im Laufe der Zeit und auf verschiedenen Ebenen der Gesetzgebung, einschließlich der internationalen, regionalen und nationalen.

Die Dimension **Wirksamkeit** bewertet die potenziellen positiven Auswirkungen der mCDR-Maßnahmen auf das Klima (Wie wirksam ist die Option bei der Reduzierung des Klimawandels?) und stellt sicher, dass die ausgewählten Methoden wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen. Während einige Kriterien wie das CDR-Potenzial und die Dauerhaftigkeit intuitiv sind und weithin verwendet werden, sind andere, wie Quantifizierung und Verifizierung, indirekte Klimaeffekte- sowie Folgen bei der Beendigung der Methode weniger erforscht und können in verschiedenen Bewertungsrahmen unterschiedlich definiert sein.

Die **wirtschaftliche Effizienz** bei der Bewertung von mCDR-Optionen umfasst mehr als nur die finanziellen Kosten; sie berücksichtigt die Zuweisung von Ressourcen zur Maximierung des gesellschaftlichen Wohlstands. Eine Option gilt als wünschenswert, wenn sie die Kosten pro CDR-Einheit minimiert, was ihre Effizienz widerspiegelt. Daher ist die wirtschaftliche Effizienz ein Schlüsselfaktor bei der Bewertung der Zweckmäßigkeit von mCDR-Maßnahmen, wobei die Frage zu berücksichtigen ist: Was sind die Kosten und der Nutzen der Option?

Die **Gerechtigkeitsdimension** umfasst die Verteilungsgerechtigkeit, bei der es um die Frage geht, ob Nutzen und Lasten gerecht verteilt sind, und die Verfahrensgerechtigkeit, bei der die Notwendigkeit fairer Entscheidungsprozesse im Vordergrund steht (Wie gerecht ist die Steuerung und die Verteilung von Nutzen und Lasten unter den Menschen?). Im Rahmen der Dimension Gerechtigkeit werden die Auswirkungen auf die natürliche Welt nur insoweit berücksichtigt, als sie den Menschen betreffen, während die Dimension Umweltethik es den Nutzern ermöglicht, weitergehende Auswirkungen auf die natürliche Welt zu bewerten.

Die Dimension **Umweltethik** erkennt an, dass die Auswirkungen auf die natürliche Welt über die Auswirkungen auf den Menschen hinaus wichtig sind. Sie ermöglicht den Nutzern des Bewertungsrahmens eine Bewertung der mCDR-Maßnahmen, die sich nicht nur auf die menschlichen

Bedürfnisse konzentriert, sondern auch der Einsicht Rechnung trägt, dass die Auswirkungen auf Tiere, die biologische Vielfalt und die Ökosysteme an und für sich wichtig sind.

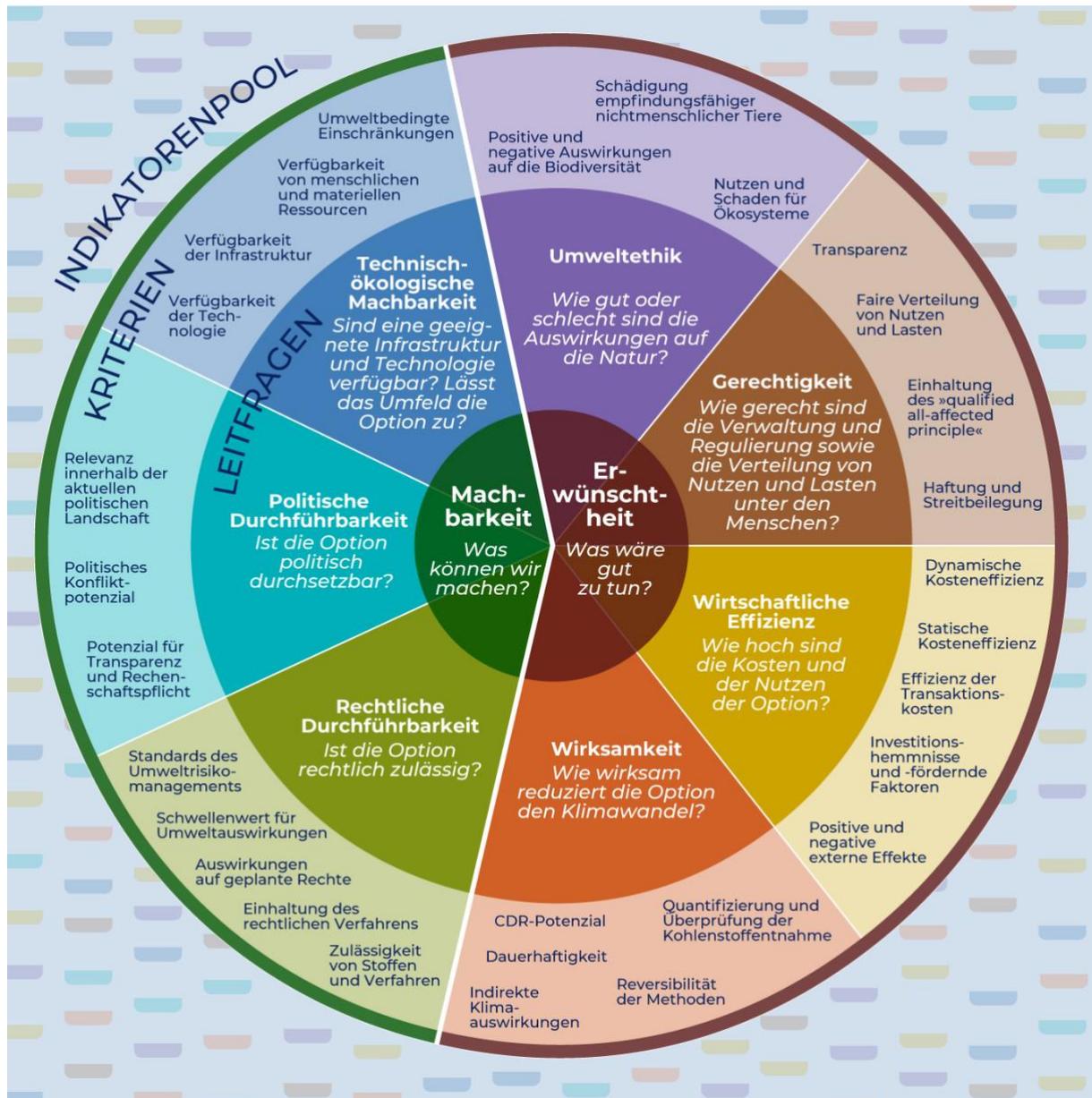


Abbildung 1: Der ASMASYS Bewertungsrahmen für mCDR-Optionen. Die zentralen übergreifenden Fragen Machbarkeit (Feasibility): „Was können wir tun?“ und Erwünschtheit (Desirability): „Was sollten wir tun?“ sind umgeben von den sieben Dimensionen (die alle gleich wichtig sind) und den Kriterien, die sich jeweils auf eine Reihe von Indikatoren (Indikatorenpool) beziehen, die quantitativ oder qualitativ sein können und als empirische Grundlage für den Bewertungsprozess dienen (Baatz et al., in Vorbereitung).

4.4 Konzeptnachweis mit hypothetischen Testfällen

Das Ziel der hypothetischen Testfall-Szenarien war es, eine strukturierte, offene Diskussion unter Verwendung hypothetischer Szenarien innerhalb des ASMASYS Bewertungsrahmens zu ermöglichen, um dessen Wirksamkeit bei der Beantwortung wesentlicher Fragen für eine fundierte Entscheidungsfindung zu bewerten. Die Testfälle waren so konzipiert, dass sie plausibel, aber völlig hypothetisch waren, um eine erste Bewertung bestimmter CDR-Methoden zu ermöglichen. Zur Bewertung der einzelnen Dimensionen wurde ein Fragebogen mit 10 bis 18 Fragen entwickelt, die sich auf relevante Indikatoren für jede Dimension stützten. Jede Frage wurde in so genannten *Think and*

Exchange Tank-Sitzungen eingehend diskutiert, die Antworten wurden aufgezeichnet, und auf der Grundlage dieser Diskussionen wurde ein Gesamturteil für jede Dimension gefällt. Bei der Erstellung der Testfälle wurde darauf geachtet, dass sie wissenschaftlich fundiert und im Rahmen der Übung so realistisch wie möglich waren. Sie lieferten wertvolle Erkenntnisse darüber, ob der Bewertungsrahmen die wichtigsten Fragen beantwortet, die für eine fundierte Entscheidung erforderlich sind. Jedes der vier Szenarien bot unterschiedliche Einblicke in die Dimensionen der verschiedenen mCDR-Ansätze. Die folgenden vier verschiedenen Methoden wurden anhand der Testfälle bewertet:

Testfall 1: Alkalinitätserhöhung im Ozean (Ocean Alkalinity Enhancement, OAE)

14. TET, 3. bis 4. Juli 2023 (Berlin): OAE-Experiment in kleinem Maßstab an der Küste.

Teilnehmende: Umweltbundesamt (UBA), Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), World Wide Fund for Nature (WWF)

Testfall 2: Erhöhte Akkumulation von blauem Kohlenstoff in maritimen Ökosystemen (Blue Carbon Ecosystems Enhancement BCEe)

16. TET, 25. – 26. September 2023 / (Warnemünde): Konzeption von Kelpwald-Ökosystemen in den Küstengewässern von Sylt als Maßnahme zur Kohlenstoffbindung.

Teilnehmende: Umweltbundesamt (UBA), Bundesamt für Naturschutz (BfN)

Testfall 3: Marine CO₂- Speicherung in der ozeanischen Kruste in der Tiefsee (mCS)

17. TET, 6. bis 7. Februar 2024 / (Berlin): Marine Kohlendioxidspeicherung in Tiefseebasaltgestein vor Norwegen.

Teilnehmende: Umweltbundesamt (UBA), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) , Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

Test Case 4: mCS in Sandsteinformationen in der Nordsee

19. TET, 23. Mai 2024 (online): Projekt GEOSTOR (kein Stakeholder beteiligt, da kurz zuvor eine Stakeholder-Veranstaltung von GEOSTOR durchgeführt wurde und das Feedback bei der Bewertung des Testfalls berücksichtigt wurde.)

Durch die Berücksichtigung spezifischer Elemente wie technisch-ökologische Machbarkeit, politische Dynamik, rechtliche Komplexität und ethische Überlegungen wurde ein ganzheitliches Verständnis dieser Ansätze erreicht. Durch die Verwendung der Indikatoren (siehe Anhang Seite 40) hat jeder Testfall zu einem ganzheitlichen Verständnis dieser Ansätze beigetragen und die Grenzen der mCDR/mCS-Technologien aufgezeigt und verschoben, indem Grenzen, Herausforderungen und Möglichkeiten bei ihrer Umsetzung aufgezeigt wurden. Einigen Szenarien mangelte es jedoch an detaillierten Informationen, was eine umfassende Bewertung erschwert. Auch wenn sie trotzdem eine realistische Situation widerspiegeln, wird der Bedarf an weiterer Forschung und Methodenentwicklung für realistische Verfahren deutlich. Bei einem hypothetischen Testfall beispielsweise ergibt sich die Hauptlücke aus seinem theoretischen Charakter, dem die Komplexität der realen Welt fehlt. Generell müssen rechtliche und ethische Aspekte sowie die gesamte Wertschöpfungskette von mCDR- und mCS-Prozessen stärker berücksichtigt werden. Zu den größten Lücken bei den meisten realen mCDR- und mCS-Anwendungen gehören die klimarelevante Hochskalierung, Kostenschätzungen, administrative Zuständigkeiten, Planung und Mechanismen zur Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV). Lokale Lösungen sind von entscheidender Bedeutung, was die Notwendigkeit unterstreicht, Ansätze auf spezifische Kontexte zuzuschneiden, selbst für Anwendungen in kleinem Maßstab.

4.5 Die 10 Mio. Tonnen CO₂-Entnahme pro Jahr – Herausforderung für Deutschland

Die „10Mt CO₂/ yr Removal Challenge for Germany“ (Yao et al. 2024, eingereicht) wurde in das Projekt ASMASYS integriert, um die Machbarkeit und das Potenzial von Technologien zur marinen CO₂-Entnahme (mCDR) und geologischen Kohlenstoffspeicherung (mCS) im spezifischen Kontext Deutschlands zu bewerten. Diese Initiative hatte das Ziel, den dringenden Bedarf an wirksamen Klimaschutzstrategien zu decken, indem untersucht wird, inwieweit mCDR und mCS einen bedeutenden Beitrag zu Deutschlands Netto-Null-Zielen leisten können.

Die Herausforderung bestand darin, Optionen zu finden, mit denen jährlich 10 Millionen Tonnen (Mt) CO₂ entfernt werden können, was 8-22% der erwarteten schwer abbaubaren Emissionen in Deutschland bis 2045 entspricht. Durch die Berücksichtigung von Faktoren wie lokale Ressourcen, geophysikalische Beschränkungen, Infrastruktur und rechtliche Vorgaben sollte der Ansatz eine realistische Einschätzung des umsetzbaren Potenzials dieser Technologien ermöglichen.

Wie bei den vier oben erwähnten Fällen wurden zehn verschiedene mCDR- und mCS-Optionen ausgearbeitet, die auf dem Fachwissen der vier im CDRmare enthaltenen Methoden (Alkalinitäts-erhöhung, blauer Kohlenstoff, künstlicher Auftrieb von Tiefenwasser und geologische CO₂-Speicherung) basieren. Dabei wurden Variationen von Einsatzorten und/oder die genauen Komponenten innerhalb der Betriebskette berücksichtigt. Es wurden zehn verschiedene mCDR- und mCS-Optionen bewertet und ihre Umwelt-, Ressourcen- und Infrastrukturanforderungen geprüft. Sechs davon haben das Potenzial, das Ziel von 10-Millionen Tonnen CO₂-Entfernung jährlich zu erreichen. Drei Optionen scheinen im deutschen Hoheitsgebiet umsetzbar: die elektrolytische Herstellung und Zugabe von alkalischer Lösung aus Silikatgestein, die Herstellung und Verteilung von Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) entlang von Schiffsrouten in der Nordsee sowie die Nutzung von Makroalgen-Biomasse für Biomethanproduktion und Kohlenstoffspeicherung in salinen Aquiferen der Nordsee.

Durch die Integration der „10Mt Challenge“ in ASMASYS soll eine umfassende Grundlage für die weitere Forschung und Politikentwicklung geschaffen werden. Diese Integration trägt dazu bei, die wichtigsten Unsicherheiten und Engpässe aufzuzeigen, die von geophysikalischen Beschränkungen und Materialverfügbarkeit bis hin zu technologischem Reifegrad und Infrastrukturkapazität reichen. Darüber hinaus unterstreicht sie, wie wichtig es ist, mCDR und mCS als entscheidende Komponenten in Deutschlands Portfolio von Klimaschutzstrategien zu betrachten.

Letztlich ging es bei dieser Initiative darum, die Erwartungen an eine groß angelegte mCDR-Umsetzung auf realistische Einschätzungen zu stützen und sicherzustellen, dass optimistische Prognosen nicht die unmittelbaren Bemühungen zur Emissionsminderung untergraben.

5. Operationelle Anwendbarkeit und Potential der Leitfragen des Bewertungsrahmens

Die technisch-ökologische Machbarkeit von mCDR-Methoden birgt Chancen und Herausforderungen. Ein entscheidender Ausgangspunkt für die Erkundung von mCDR- und mCS-Optionen ist das Vorhandensein günstiger Umweltbedingungen und der Technologische Reifegrad (Technological Readiness Levels, TRL; Terrile et al. 2015), die eine solide Grundlage für die Förderung dieser Initiativen bilden. Diese Bedingungen sind zwar vielversprechend, aber die Skalierbarkeit ist ein entscheidender Faktor. Viele mCDR-Technologien befinden sich noch in der Frühphase der Entwicklung oder Erprobung (Eisaman et al. 2023). Um diese Technologien zu skalieren, müssen die Technology Readiness Levels (TRLs) erhöht werden, damit sie in größerem Maßstab zuverlässig funktionieren. Dies erfordert eine umfangreiche Infrastruktur, wie z. B. Spezialschiffe, Ausrüstung, Anlagen oder

erhebliche Mengen an Ressourcen, einschließlich Materialien und grüner Energie, die in kleinerem Maßstab möglicherweise nicht ohne weiteres verfügbar oder kosteneffizient sind.

Der Erfolg bei der Umsetzung groß angelegter mCDR-Maßnahmen hängt von der Fähigkeit ab, die Herausforderungen der Integration zu bewältigen und die Technologien an die spezifischen Umweltbedingungen anzupassen. Trotz der theoretischen Machbarkeit einiger mCDR- und mCS-Lösungen haben Diskussionen über praktische Umsetzungsszenarien Komplexitäten und Lücken aufgezeigt, die es zu schließen gilt. Weitere Unsicherheiten bestehen vor allem bei der Vorhersage der langfristigen Eignung und Wirksamkeit angesichts von Umweltveränderungen, einschließlich der Auswirkungen des Klimawandels. Eine unzureichende Umweltkartierung und die geringe Beteiligung des Privatsektors behindern den Fortschritt in diesem Bereich zusätzlich. Der großflächige Einsatz von mCDR-Methoden könnte unvorhergesehene Auswirkungen auf die Umwelt haben, z. B. die Veränderung von Meeresökosystemen oder die Beeinträchtigung der Meereschemie. Das Verständnis und die Abschwächung dieser Auswirkungen sind für die Skalierbarkeit von entscheidender Bedeutung. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert eine systematische und präzise Herangehensweise. Klare Kommunikation, Zusammenarbeit und Transparenz zwischen den Interessengruppen und der Gesellschaft sind für den Erfolg entscheidend. Darüber hinaus sind die Erfassung der relevanten Akteur:innen und die Förderung der Zusammenarbeit entscheidende Schritte, um die technisch-ökologische Machbarkeit voranzutreiben. Die Bewältigung von Integrationshindernissen und die Beherrschung von Unsicherheiten in der Umwelt sind von entscheidender Bedeutung, um das Potenzial groß angelegter mCDR-Initiativen zur Verringerung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und zur Eindämmung des Klimawandels zu nutzen und gleichzeitig die Umwelt zu schützen und wiederherzustellen.

Die **politische Machbarkeit** wird durch die kombinierte Motivation und Fähigkeit einer Reihe von politischen Akteur:innen geprägt, ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen (Jewell und Cherp 2020), z. B. Forschung, Entwicklung, Demonstration oder Einsatz von marinen CDR- und/oder mCS-Optionen. (Patterson et al. 2018). Obwohl die öffentliche Wahrnehmung und die mediale Darstellung der vorgeschlagenen Optionen sicherlich wichtige Faktoren sind, spielen die Rationalitäten politischer Institutionen – wie Parlamente und öffentliche Verwaltungen, die für die Festlegung verbindlicher Regelungen zuständig sind – häufig eine zentrale Rolle bei der Bestimmung der politischen Umsetzbarkeit dieser Optionen. Die Positionen dieser Arten von politischen Organisationen – und das Ausmaß der Konflikte zwischen ihnen – sind der Schlüssel zur Bestimmung der politischen Durchführbarkeit von mCDR- und mCS-Aktivitäten (Geden 2016; Boettcher, Schenuit und Geden 2023). Das Ausmaß, in dem mCDR in die bestehende klimapolitische Landschaft eines bestimmten Landes oder einer Region passt, wird sich ebenfalls auf die politische Durchführbarkeit auswirken. Und schließlich spielt die Frage, ob es politische Instrumente gibt, die die Transparenz und (politische) Rechenschaftspflicht einer bestimmten mCDR-Umsetzung sicherstellen, eine große Rolle für die Durchführbarkeit. Die politische Durchführbarkeit hängt ferner von Wahlergebnissen, internationalen Entwicklungen und der Transparenz der Debatte über die mCDR-Methoden ab, wobei die Medien eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung von Narrativen und Transparenz spielen. Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören die Notwendigkeit einer breiten politischen Unterstützung für mCDR-Initiativen und die Anerkennung der politischen Agenda von NGOs.

Die Debatte um die gesellschaftliche Akzeptanz von mCDR ist geprägt von früheren Erfahrungen mit Protesten gegen Forschungsprojekte (Bertram und Merk 2020; Otto et al. 2022). Diese Konflikte haben gezeigt, dass es wichtig ist, frühzeitig mit der betroffenen Öffentlichkeit in Kontakt zu treten und transparent zu kommunizieren, um deren Bedenken bei Entscheidungen über und der Gestaltung von mCS- und mCDR-Projekten zu berücksichtigen. Eine offene und umfassende politische Debatte ist notwendig, aber insbesondere wenn sie polarisiert wird, könnte das politische Versprechen von mCS und mCDR auch zu weiteren Verzögerungen bei den unmittelbaren Dekarbonisierungsbemühungen führen (Boettcher et al. 2021; Low und Boettcher 2020). Die Möglichkeit der fortgesetzten Nutzung fossiler Brennstoffe sowie die finanziellen Auswirkungen könnten die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, dass diese Maßnahmen von politischen Entscheidungsträgern und Interessengruppen akzeptiert und

umgesetzt werden. Zu den Wissenslücken gehören die wirtschaftliche Machbarkeit, die Rolle der Medien und die Frage, wie mCDR in die marine Raumplanung integriert werden kann. Auch der Grad des öffentlichen Bewusstseins und der Wahrnehmung von mCDR/mCS im Offshore-Bereich muss weiter erforscht werden.

Die **rechtliche Machbarkeit** wird sowohl durch nationale Hindernisse als auch durch internationale Unsicherheiten bestimmt. Während die mögliche Realisierbarkeit in Deutschland bis 2028 von absehbaren rechtlichen Änderungen abhängt (Borchers et al. 2024), hängt der Einsatz außerhalb nationaler Gewässer von internationalen Regelungen ab, die sich langsamer entwickeln. Leider besteht derzeit auf internationaler Ebene ein hohes Maß an Rechtsunsicherheit, was zum Teil auf den Mangel an wissenschaftlichen Daten über negative Auswirkungen und das Fehlen eines politischen Konsenses in allen Fragen zurückzuführen ist. Dies macht mCDR-Anwendungen in internationalen Gewässern rechtlich riskant, was Wirtschaftsakteure abschrecken kann. Es ist jedoch wichtig anzuerkennen, dass eine gute internationale Gesetzgebung eine Grundvoraussetzung für den Erfolg der Anwendung von mCDR-Methoden ist. Das Londoner Protokoll ist ein gutes Beispiel für einen innovativen Ansatz in der mCDR-Forschung, der Umweltrisiken berücksichtigt und gleichzeitig darauf abzielt, die Wissensbasis zu erweitern, indem ein sicherer Handlungsspielraum geschaffen wird. Politische, wirtschaftliche und rechtliche Erwägungen überschneiden sich und unterstreichen die Bedeutung umfassender Ansätze für die Bewertung und Planung von Vorschlägen zur Umsetzung von mCDR-Maßnahmen.

Die **Wirksamkeit** von Initiativen zur Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid im Meer ist für die Eindämmung des Klimawandels von größter Bedeutung. Die genaue Überwachung und Verifizierung der Nettoentnahme und der langfristigen CO₂-Speicherung ist eine große Herausforderung. Die Überwachung der langfristigen Speicherung ist mit erheblichen Hindernissen verbunden und erfordert innovative Ansätze zur Überprüfung. Trotz dieser Herausforderungen könnten Experimente wertvolle Erkenntnisse für die Ausweitung der mCDR-Bemühungen liefern. Ein entscheidender Aspekt bei der Bewertung der Wirksamkeit ist die Durchführung einer vollständigen Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA), um die Gesamtwirksamkeit der CO₂-Entnahme vollständig zu verstehen. Die Ökobilanz (im Sinne eines LCAs) ist nicht nur für den Genehmigungsprozess entscheidend; sie hilft auch dabei, die Umweltwirkungen zu bewerten und die Skalierbarkeit zu analysieren.

Es bestehen noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Skalierbarkeit von mCDR-Experimenten und des Umfangs der Ausgleichskosten. Darüber hinaus ist das Verständnis der wirtschaftlichen Machbarkeit und der potenziellen Rentabilität von mCDR-Maßnahmen für die Entscheidungsfindung nach wie vor unerlässlich. Transparente und internationale Berechnungsmethoden sind für eine wirksame Überwachung und Überprüfung von mCDR-Initiativen von entscheidender Bedeutung. Letztendlich wird die Wirksamkeit von mCDR- und mCS-Maßnahmen künftige Strategien zur Eindämmung des Klimawandels prägen. Dies unterstreicht die Bedeutung robuster Experimente und umfassender Bewertungen.

Die **wirtschaftliche Effizienz** spielt eine entscheidende Rolle bei der Ausweitung von Initiativen zur Entnahme, Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid im Meer, die von geringer Relevanz in Pilotstudien zu kritischer Bedeutung bei Anwendungen in größerem Maßstab übergehen. Die Kosten für Technologieentwicklung, Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) sowie Ausgleichszahlungen könnten die Kosteneffizienz von mCDR-Methoden erheblich beeinflussen. Es ist jedoch noch nicht bekannt, ob diese Kosten überhaupt anfallen und wie hoch sie wären. Eine genaue Schätzung der Anfangskosten ist für realistische Finanzprognosen unerlässlich, doch die zahlreichen Unbekannten sind eine Herausforderung in Bezug auf die Wirksamkeit des Ansatzes.

Darüber hinaus unterstreicht die Betonung der Kostensenkung, wie wichtig es ist, den wirtschaftlichen Nutzen und die Rentabilitätskriterien im Zusammenhang mit den mCDR-Optionen klar zu definieren.

Die Bewältigung dieser wirtschaftlichen Herausforderungen erfordert transparente und internationale Berechnungsmethoden, um ein effektives Kostenmanagement und eine effektive Finanzplanung zu gewährleisten. Die Beteiligten müssen sowohl vor als auch nach der Projektdurchführung Zugang zu

umfassenden Informationen haben, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wirtschaftlichkeitsüberlegungen mit zunehmender Ausweitung der mCDR- und mCS-Bemühungen immer wichtiger werden, was die Notwendigkeit präziser Kostenschätzungen, klarer Kostenzuweisung und Transparenz in den Finanzplanungsprozessen hervorhebt.

Gerechtigkeitserwägungen in marinen mCDR-Strategien sind vielschichtig, wobei sich die Verteilungsgerechtigkeit oft auf die potenziellen Auswirkungen auf lokale Gemeinschaften und Branchen konzentriert, beispielsweise Tourismus, Fischerei und kulturelle Dienstleistungen. Die Verteilungsgerechtigkeit bezieht sich aber auch darauf, wie Lasten und Nutzen global und generationenübergreifend verteilt werden. Auch die Verfahrensgerechtigkeit ist von entscheidender Bedeutung, denn sie verlangt eine sinnvolle Einbeziehung in Entscheidungsprozesse, um faire und gerechte Ergebnisse zu gewährleisten. Die derzeitigen Bewertungsstandards weisen erhebliche Lücken auf, insbesondere in Bezug auf die Umweltauswirkungen von mCDR-Technologien. Das Fehlen von Genehmigungs- und umfassenden Bewertungsverfahren für viele mCDR-Technologien erschwert die Bestimmung der Auswirkungen auf die Verteilungs- und Verfahrensgerechtigkeit. Darüber hinaus stellt es eine Herausforderung dar, die heterogenen Bereiche der Verfahrens- und Verteilungsgerechtigkeit miteinander in Einklang zu bringen. Eine Integration dieser Bereiche ist erforderlich, um zu einem einheitlichen Urteil über die Gerechtigkeit einer mCDR-Maßnahme zu gelangen.

Die Rahmenbedingungen für die Berücksichtigung von Gerechtigkeitserwägungen sind nach wie vor ungewiss, was die Komplexität des Themas noch weiter erhöht. Die Berücksichtigung von Gerechtigkeitserwägungen in mCDR-Strategien erfordert umfassende Bewertungsstandards, die die gesamte Wertschöpfungskette umfassen, einschließlich der Energieerzeugung und anderer landbasierter Komponenten wie des Raumbedarfs. Der Ausgleich zwischen Verteilungs- und Verfahrensgerechtigkeit erfordert eine sinnvolle Einbeziehung in Entscheidungsprozesse und eine sorgfältige Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen auf lokale Gemeinschaften und Ökosysteme. Die Fokussierung auf soziale Gerechtigkeit könnte die politische Durchführbarkeit des Erreichens von 1,5 °C- oder 2,0 °C-Klimazielen verbessern, indem sowohl öffentliche als auch private Maßnahmen in einer Größenordnung legitimiert und angeregt werden, die dem dringenden Transformationsbedarf entsprechen (Patterson et al. 2018), was zu intergenerationaler Gerechtigkeit beitragen würde. Transparenz, Rechenschaftspflicht und Zugang zu Umweltdienstleistungen müssen in Governance-Rahmenwerken Priorität haben, um gerechte Ergebnisse für alle an mCDR-Initiativen beteiligten Akteure zu gewährleisten. Letztendlich müssen Gerechtigkeitsüberlegungen in die Bewertungen der Wirksamkeit und der wirtschaftlichen Effizienz integriert werden, um die Auswirkungen von mCDR-Strategien auf Mensch und Umwelt umfassend zu bewerten.

Umweltethische Erwägungen bei der Umsetzung von mCDR-Strategien unterstreichen die Bedeutung umfassender Bewertungsstandards für Umweltauswirkungen. Die Größe und das Ausmaß der Umweltauswirkungen spielen eine wichtige Rolle, wobei sehr lokal begrenzte Auswirkungen wahrscheinlich weniger stark gegen eine Option sprechen. Die ethischen Implikationen des Ersatzes eines Ökosystems durch ein anderes erfordern jedoch eine sorgfältige Untersuchung, insbesondere im Hinblick auf die Überwachung zusammenhängender Gebiete. Die derzeitigen Bewertungsstandards für Umweltauswirkungen sind nicht umfassend genug, was den Bedarf an klareren Leitlinien, die das gesamte Spektrum der Auswirkungen abdecken, deutlich macht. Unsicherheit besteht auch bei der Gewichtung von umweltethischen Urteilen, wobei es unterschiedliche Auffassungen über den Wert kollektiver und individueller Komponenten von Ökosystemen gibt. Darüber hinaus variiert die praktische Anwendung ethischer Grundsätze, wobei einige Interessengruppen für eine direkte Bilanzierung der Auswirkungen auf Pflanzen und nicht empfindungsfähige Lebensformen eintreten. Die Berücksichtigung der Umweltethik für die Bewertung von mCDR-Methoden erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, der die umfassenderen Auswirkungen auf das Ökosystem berücksichtigt und die Abwägung zwischen verschiedenen Umweltwerten bewertet. Transparenz und Zugang zu Umweltinformationen sind für eine ethische Entscheidungsfindung von entscheidender Bedeutung,

was die Notwendigkeit klarer Richtlinien und Mechanismen zur Rechenschaftslegung unterstreicht. Das Verständnis des Verhältnisses zwischen globalem und lokalem Nutzen und der ethischen Implikationen der Bewertung der Kohlenstoffspeicherung ist für eine fundierte Entscheidungsfindung unerlässlich. Insgesamt sollten die Umweltauswirkungen bei der Entwicklung und Umsetzung von mCDR-Strategien eine zentrale Rolle spielen, wobei der Schwerpunkt auf der Förderung der Nachhaltigkeit und der ethischen Verantwortung für die marinen Ökosysteme liegen sollte.

6. Erforschung der marinen Kohlendioxid-Entnahme in Deutschland

Das nächste Kapitel bietet kurze Übersichten über zwei mCDR-Methoden, die einen Einblick in ihren Status, ihr geschätztes Potenzial und die öffentliche Debatte geben. Darüber hinaus enthält es eine kurze Zusammenfassung der Bewertung auf der Grundlage des ASMASYS Bewertungsrahmens, in der die Durchführbarkeit und Erwünschtheit jeder Methode bewertet wird. Der ASMASYS Bewertungsrahmen wurde durch die Validierung mit Interessenvertretern unter Verwendung hypothetischer Testfälle (Kap. 4.4) verfeinert, um den Rahmen selbst mit mCDR-technologiespezifischen Erkenntnissen zu testen.

6.1 Erhöhung der Alkalinität im Ozean

Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie

Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) ist eine vorgeschlagene Methode zur marinen Kohlendioxid-Entnahme (mCDR), bei der CO₂-reaktive alkalische Mineralien, chemische Basen oder deren Dissoziationsprodukte in das Oberflächenwasser der Ozeane eingebracht werden. Dadurch wird die Alkalinität der Meeresoberfläche erhöht, der CO₂-Partialdruck gesenkt und möglicherweise die CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre intensiviert oder die CO₂-Freisetzung aus dem Meer verringert. Darüber hinaus hat OAE das Potenzial, die Versauerung der Ozeane lokal zu reduzieren, indem es den pH-Wert anhebt und die theoretische Haltbarkeit der Kohlenstoffspeicherung erhöht (Hartmann et al. 2023). OAE weist ein erhebliches Sequestrationspotenzial auf, das auf 3 bis 30 Gt CO₂ pro Jahr geschätzt wird (Köhler et al. 2013; Renforth und Henderson 2017; Feng et al. 2017), wobei es eine Vielzahl vorgeschlagener Einsatzmöglichkeiten gibt (Oschlies et al. 2023).

Aufgrund der dringenden Notwendigkeit, das Kohlenstoffspeicherpotenzial und die damit verbundenen Risiken zu verstehen, wurde ein Leitfaden für bewährte Praktiken zur Erforschung der Alkalinitätserhöhung des Ozeans ([Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research](#)) entwickelt. Dieser Leitfaden fördert eine verantwortungsvolle und transparente wissenschaftliche Forschung, um schnell zuverlässige Informationen und Empfehlungen für wirksame Experimente und die Zusammenarbeit im Bereich der OAE als Kohlendioxid-Entnahmestrategie zu generieren (Riebesell et al. 2023; Cyronak, Albright, and Bach 2023).

OAE befindet sich derzeit in der „Konzeptphase“ der ozeanbasierten Klimaschutzmaßnahmen, die ein hohes Wirksamkeitspotenzial aufweisen, deren Durchführbarkeit, Umweltauswirkungen und Kosteneffizienz jedoch erst noch nachgewiesen werden müssen (Gattuso et al. 2021). Bisher gibt es nur wenige experimentelle Feldstudien (<10), die sich mit diesem Thema befassen. Nach wie vor bestehen entscheidende Wissenslücken in Bezug auf die Methoden der Alkalinitätszufuhr und -zugabe, Alkalinitätsverlust und Stabilität, Materialverarbeitung und Transport, ideale Einsatzorte, mCDR-Potenzial, Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung und sozioökonomische Aspekte (Hartmann et al. 2023; Bach 2024; He und Tyka 2023; Suitner et al. 2023). Es wurden mehrere OAE-Methoden

entwickelt, darunter die Injektion alkalischer Flüssigkeiten in den Ozean, die Ausbringung alkalischer Partikel von Schiffen oder Plattformen aus, die Zugabe von Mineralien in die Küstenumwelt und die elektrochemische Entnahme von Säure aus dem Meerwasser. Diese OAE-Methoden haben unterschiedliche technologische Reifegrade (Technology Readiness Levels, TRL) (Eisaman et al. 2023), auf relativ niedrigem Niveau: im Allgemeinen werden sie als 1-2 eingestuft (Lamb et al. 2023), 3-4 für spezifische Methoden (Foteinis et al. 2022; Foteinis, Campbell und Renforth 2023) und möglicherweise 5-6 für diejenigen, die erste Feldversuche in Vorbereitung oder in Durchführung haben (Eisaman et al. 2023). So weisen beispielsweise Pilotstudien für Systeme zur beschleunigten Verwitterung von Kalkstein (AWL) in Taiwan einen TRL von 5-6 auf, und die Erprobung von CO₂-Elektrolyse mit Wasser (CEW) einen TRL von 4-5. Ocean Liming (OL) ist ebenfalls bei TRL 4-5 angelangt. In Deutschland wird das Potenzial einer verstärkten benthischen Verwitterung in der Ostsee erforscht, indem Verwitterungsprozesse unter anoxischen bis hypoxischen Bedingungen in korrosivem Bodenwasser untersucht werden. Dabei zeigt sich, dass zugesetztes Dunit und Kalzit die Freisetzung von Alkalinität im Vergleich zu Kontrollexperimenten deutlich erhöht (Fuhr et al. 2024). Jede Methode hat ihre eigenen Vorteile und Nachteile in Bezug auf Skalierbarkeit, Kostenwirksamkeit, Effizienz und potenzielle Umweltauswirkungen.

Welche der OAE-Methoden spezifisch anwendbar ist, hängt von Faktoren wie den regionalen ozeanografischen Bedingungen, der Verfügbarkeit von Alkalitätsquellen und der regionalen technischen Machbarkeit ab. Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind unerlässlich, um die TRLs voranzutreiben und die Auswirkungen der OAE-Methoden unter verschiedenen ozeanischen Bedingungen zu bewerten, wobei Unsicherheiten hinsichtlich der langfristigen ökologischen Auswirkungen und der großmaßstäblichen Durchführbarkeit für mCDR zu berücksichtigen sind. Die Skalierung von OAE auf klimarelevante Größenordnungen erfordert die Bewältigung von technologischen, Akzeptanz- und Governance-Herausforderungen, wobei robuste MRV (Monitoring, Reporting and Verification)-Verfahren und eine erweiterte Klimapolitik für eine groß angelegte Umsetzung erforderlich sind (Ho et al. 2023; Nawaz et al. 2023). Die Beantwortung dieser Fragen ist herausfordernd, aber entscheidend für die Ausschöpfung des Potenzials von OAE bei der Eindämmung des Klimawandels.

Die größten Herausforderungen ergeben sich aus der Notwendigkeit und den Unsicherheiten bei der Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung (MRV) der Kohlenstoffbindungsraten, die für die Bewertung der CO₂-Entnahme entscheidend sind. Ein wichtiger Aspekt hierfür ist das Verständnis der Auswirkungen von Ökosystemreaktionen auf die CO₂-Bindung. Jüngste Forschungsarbeiten (Bach 2024) haben das „Zusätzlichkeitsproblem“ von OAE aufgezeigt. Durch die künstliche Erhöhung der Karbonatsättigung können OAE-Eingriffe die natürliche Freisetzung von Alkalinität aus den Sedimenten in das Oberflächenwasser des Ozeans verringern, wodurch die geschätzte natürliche CO₂-Entnahme um etwa 12 % sinkt. Die Einbeziehung solcher biogeochemischen Rückkopplungen in MRV-Verfahren ist entscheidend, um die Wirksamkeit von OAE-Maßnahmen bei der CO₂-Entnahme und der Minderung der Ozeanversauerung abzuschätzen. Dies gewährleistet Verfeinerungen der Abschätzung der CO₂-Entnahmemengen, für eine zuverlässigere und transparentere Bewertungen der Auswirkungen von OAE-Eingriffen als mCDR-Maßnahmen.

Öffentliche Debatten und Wahrnehmungen

Die Forschung über die öffentliche Wahrnehmung der Erhöhung der Alkalinität im Ozean (OAE) als mCDR-Strategie ist begrenzt. Umfragen von Nawaz et al. (Nawaz, Peterson St-Laurent und Satterfield 2023) und Merk et al. (Merk, Andersen und Tvinnereim 2023) ergaben, dass die Befragten von den untersuchten Negative Emissions Technologien (NETs) am wenigsten mit OAE einverstanden waren. Im Vergleich zu anderen NETs, einschließlich terrestrischer Optionen wie CO₂-Sequestrierung in Böden und Aufforstung sowie ozeanbasierter Methoden wie Ozeandüngung, wurde OAE weniger Vertrauen entgegengebracht. Dies deutet auf Skepsis und Unbehagen in der Öffentlichkeit gegenüber der Erhöhung der Alkalinität im Ozean als Strategie zur Beseitigung von Kohlendioxid im Meer hin. Gespiegelt werden jene Bedenken, die mit der beschleunigten Verwitterung an Land verbunden sind,

insbesondere im Hinblick auf die wahrgenommenen Risiken und Umweltauswirkungen auf marine Ökosysteme und den umfangreichen Abbau, Transport und die Verklappung der benötigten Materialien (Cox et al. 2020). Darüber hinaus wird eine fehlende Kontrollierbarkeit als Grund für negative Assoziationen genannt (Merk et al. 2023).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Erhaltung der Meeresumwelt für die Bevölkerung ein wichtiges Anliegen ist. Zudem gibt es kaum Belege für die Annahme, dass meeresbasierte Methoden nur deshalb positiver wahrgenommen werden, weil sie nicht sichtbar sind. Die Erhöhung der Alkalinität im Ozean ist eine entscheidende Komponente für eine tiefgreifende Dekarbonisierung der Industrie und steht im Einklang mit den umfassenderen Bemühungen um Kohlenstoffmanagement und Technologien für negative Emissionen ([LibMod Policy Paper](#)). Um eine breite gesellschaftliche Akzeptanz für diese Transformationsprozesse zu erreichen, sind ergänzende Strategien erforderlich. Veränderungen der Alkalinität der Meere können sich regional unterschiedlich auswirken. Die frühzeitige Einbindung lokaler Gemeinschaften und Interessengruppen ist entscheidend, um ihre spezifischen Bedürfnisse und Bedenken im Zusammenhang mit der Umsetzung von OAE zu verstehen. Eine wirksame Kommunikation der Ziele und Auswirkungen der OAE ist von entscheidender Bedeutung. Die Informationen sollten auf verschiedene Zielgruppen zugeschnitten sein und partizipative und kreative Formate nutzen, um den Wissenstransfer und den Dialog zwischen Industrie, Politikern und der Öffentlichkeit zu fördern. Der Aufbau von Vertrauen bei den Bürgern ist entscheidend. Sie sollten sich einbezogen und befähigt fühlen, zum OAE-Prozess beizutragen. Das offene Ansprechen von Bedenken ist entscheidend für den Aufbau von Vertrauen. Ehrliche und transparente Diskussionen über die Kosten, den Nutzen und die Herausforderungen von OAE sind notwendig. Eine offene Diskussion über die Möglichkeiten und Hindernisse der Verbesserung der Ozeanalkalinität fördert eine fundierte Entscheidungsfindung und gesellschaftliche Akzeptanz (Satterfield et al. 2023).

Bewertung nach Dimensionen

Die Überprüfung der OAE-Implementierung durch den ASMASYS Bewertungsrahmen hat sowohl das erhebliche Potenzial als auch die beträchtlichen Herausforderungen und Unsicherheiten dieser mCDR-Technologie aufgezeigt. Bei dem 14. TET (3.-4. Juli 2023 Berlin, Testfall 1) wurde ein hypothetisches, kleinräumiges, küstennahes OAE-Experiment diskutiert, das für die deutsche AWZ in der Ostsee ab 2026 geplant ist. In diesem Szenario werden 10.000 Tonnen gemahlener Kalkstein auf einmal eingebracht, um die Auswirkungen über einen Zeitraum von zwei Jahren zu beobachten und so wichtige Erkenntnisse über die Machbarkeit und Zweckmäßigkeit von OAE zu gewinnen. Die technologisch-ökologische Machbarkeit deutet auf günstige Bedingungen mit vorhandener Infrastruktur und geeigneten lokalen Bedingungen für Experimente hin. In politischer Hinsicht ist die Machbarkeit gegeben, hängt aber von Wahlergebnissen und EU-politischen Entwicklungen ab, wobei Transparenz von entscheidender Bedeutung ist. Rechtlich gibt es noch Unsicherheiten. Eine legitime OAE-Forschung könnte möglich sein, wenn die deutsche Gesetzgebung, insbesondere das [HSEG](#), angepasst wird. Diese Anpassungen wurden kürzlich im [Eckpunktepapier LNe](#) vom BMWK vorgeschlagen, wobei Öffentlichkeitsbeteiligung und rechtlichen Interventionen berücksichtigt wurden (siehe auch Kapitel 2). Ökonomisch ist die Relevanz für Pilotstudien gering, mit insgesamt positiver Bewertung aufgrund der geringen Kosten, wobei die Höhe der Kosten für das Monitoring ungewiss bleibt.

Auch wenn die Wirksamkeit des Testfalls gering sein soll, besteht ein potenzieller Gewinn an Grundkenntnissen über die Wirksamkeit der Methode in der „realen Welt“ und ihre Skalierbarkeit (in der Region). Allerdings bleiben Überlegungen zur Gerechtigkeit unklar, was die Notwendigkeit spezifischer Bewertungsfragen unterstreicht. Die Pilotprojekte haben die Machbarkeit bewiesen, aber eine globale Ausweitung erfordert die Überwindung logistischer, rechtlicher und finanzieller Hindernisse und die Auswahl von Standorten, die auf regionale Unterschiede zugeschnitten sind, um maximale Effizienz zu erzielen. Die Anwendung bewährter Verfahren, einschließlich umfassender Umweltprüfungen und transparenter Einbeziehung der Öffentlichkeit, ist entscheidend für eine

verantwortungsvolle Einführung und die Verfeinerung der Methoden auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen. Die Einhaltung bewährter Praktiken, wie sie im Leitfaden für bewährte Praktiken in der Forschung zur Erhöhung der Alkalinität der Ozeane ([Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research](#)) vorgeschlagen werden, ist von entscheidender Bedeutung.

6.2 Akkumulation von blauem Kohlenstoff in marinen Ökosystemen

Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie

Für die Akkumulation von blauem Kohlenstoff in maritimen Ökosystemen ist auch im Deutschen der englische Begriff Blue Carbon Ecosystems (BCEs) bzw. Blue Carbon (BC) gebräuchlich. Er bezieht sich auf CO₂, das aus der Atmosphäre absorbiert und als Kohlenstoff in marinen Ökosystemen gespeichert wird. Dazu gehört Kohlenstoff, der in Unterwassersedimenten, Küstenvegetation und Böden sowie in Meereslebewesen gespeichert ist. Blauer Kohlenstoff gilt nur dann als mCDR-Ansatz, wenn bestehende Ökosysteme erweitert werden. Die bloße Wiederherstellung bestehender Ökosysteme zählt nur als Emissionsminderung (Mengis, Paul und Fernández-Méndez 2023). Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass die erwarteten positiven Nebeneffekte groß sind und dass die Wiederherstellung durch EU- und deutsches Recht geregelt ist und auch dann umgesetzt wird, wenn Unsicherheiten bezüglich der mCDR-Wirksamkeit bestehen ([EU-Naturschutzgesetz](#)).

Mangroven, Seegraswiesen und Gezeitensümpfe speichern weltweit auf einer Fläche von 185 Millionen Hektar über 30.000 Teragramm Kohlenstoff (Tg C) und bieten Vorteile wie Küstenschutz, verbesserte biologische Vielfalt und Fischerei. Die Menge an CO₂-Emissionen, die durch Blue Carbon Ökosysteme reduziert, gebunden oder vermieden wird, wird in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) ausgedrückt und ermöglicht den Vergleich und die Zusammenfassung der Auswirkungen verschiedener Treibhausgase auf der Grundlage ihres globalen Erwärmungspotenzials. Durch den Erhalt dieser Ökosysteme könnten jährlich 304 Tg CO₂e vermieden werden (Macreadie et al. 2021). Das Wiederherstellungspotenzial umfasst 0,2 bis 2,2 Millionen Hektar Gezeitensümpfe, 8,3 bis 25,4 Millionen Hektar Seegräser und 9 bis 13 Millionen Hektar Mangroven, die bis 2030 zusätzlich 841 Tg CO₂e pro Jahr binden könnten, was etwa 3 % der globalen Emissionen auf der Grundlage der Daten für 2019-2020 entspricht (Macreadie et al. 2021).

Der Schutz und die Wiederherstellung von Mangroven bieten den größten Nutzen für die zusätzliche Akkumulation von Kohlenstoff (Jakovac et al. 2020). Allerdings ist mehr Forschung erforderlich, sowohl bei Mangroven, aufgrund der Variabilität der Kohlenstoffspeicherung an verschiedenen Standorten, als auch bei anderen Küstenökosystemen mit blauem Kohlenstoff, aufgrund verschiedener Unsicherheiten. Auch wenn es unwahrscheinlich ist, dass die Zerstörung aller BCEs gestoppt werden kann und nicht alle Verluste wiederhergestellt werden können, bietet die Planung des Küstenschutzes Möglichkeiten zur Wiederherstellung durch die Bewertung von positiven Nebeneffekten (Co-Benefits). Die Priorisierung von BCEs ist eine kosteneffiziente und skalierbare Lösung für das Klima, aber es gibt noch Hindernisse, bevor Blue Carbon Projekte auf breiter Basis angenommen werden können. Die Methoden zur Wiederherstellung von Mangroven und Salzwiesen sind technisch ausgereift und zunehmend kosteneffizient. Die Wiederherstellung von Seegraswiesen ist teurer und manchmal ineffektiv, mit ungewissem Nutzen für die Kohlenstoffspeicherung (Merk et al. 2022). Insgesamt unterscheiden sich die Blue Carbon Methoden in ihrer technologischen Reife (Merk, Grunau, et al. 2022). Mangroven und Salzwiesen sind am weitesten fortgeschritten und kosteneffizient, während sich die Methoden für Seegras und Meerestierpopulationen noch in der Entwicklung befinden und mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Trotz dieser Herausforderungen machen die ökologischen und sozialen Vorteile von Blue Carbon Maßnahmen diese zu einem vielversprechenden Bestandteil von Strategien zur Eindämmung des Klimawandels (Macreadie et al. 2021).

Öffentliche Debatten und Wahrnehmungen

Die öffentliche Wahrnehmung von blauem Kohlenstoff als mCDR-Strategie beinhaltet ein komplexes Zusammenspiel von lokalen und globalen Perspektiven, soziodemografischen Faktoren und der wahrgenommenen Natürlichkeit von Naturschutzbemühungen. Die Ergebnisse von Nawaz et al. (Nawaz, Peterson St-Laurent und Satterfield 2023) zeigen eine starke öffentliche Unterstützung für Wiederherstellungsmaßnahmen, die klare ökologische und wirtschaftliche Vorteile aufweisen. Blue Carbon Methoden bergen geringe ökologische Risiken und zahlreiche Vorteile, darunter Sturmschutz, Verbesserung der Wasserqualität, Verhinderung von Küstenerosion, erhöhte Biodiversität, Nahrungsmittelversorgung und Unterstützung verschiedener menschlicher Lebensgrundlagen (Merk, Grunau, et al. 2022). Zwar gibt es soziale und ordnungspolitische Herausforderungen, doch sind diese im Allgemeinen zu bewältigen, insbesondere bei einer gerechten Verteilung der Vorteile. Die öffentliche Unterstützung für die Erhaltung von Ökosystemen und positive Synergien mit bestehenden Umweltgesetzen erhöhen die Durchführbarkeit dieser Ansätze zusätzlich.

Organisationen wie [CANEurope.org](https://caneurope.org) haben diese Art von mCDR-Ansätzen nicht ausdrücklich befürwortet, betonen aber die Verbesserung des Kohlenstoffspeicherpotenzials von Meeres-ökosystemen. Sie setzt sich für den Schutz von Gebieten mit blauem Kohlenstoffspeicherpotenzial ein und fordert mehr Forschung über die Kohlenstoffspeicherfähigkeiten von Meeresökosystemen wie Kelpwäldern und Algen, um die Politik mit soliden wissenschaftlichen Daten zu versorgen. Die Menschen bevorzugen Projekte mit sichtbaren und greifbaren Ergebnissen, wie z. B. die Wiederherstellung von Mangroven und Küstengebieten, da diese wichtige Dienstleistungen erbringen, die den Lebensunterhalt vor Ort sichern, und diese Abhängigkeit beeinflusst die Einstellung der Öffentlichkeit zu ihrer Erhaltung und Wiederherstellung erheblich. So unterstützen Menschen, die auf nicht-extraktive Nutzungen wie Sturmschutz und Aufwuchsgebiete für die Fischerei angewiesen sind, Schutzbemühungen eher als Menschen, die von extraktiven Nutzungen wie der Holz- und Brennholzgewinnung abhängen (Stone et al. 2008; López-Medellín, Castillo und Ezcurra 2011; Badola, Barthwal und Hussain 2012).

Auch soziodemografische Faktoren spielen eine entscheidende Rolle. Das Bildungsniveau, das Bewusstsein für Ökosystemleistungen und der soziokulturelle Hintergrund beeinflussen die Einstellung erheblich. Ein höheres Bildungsniveau wird mit einem größeren Bewusstsein und einer größeren Unterstützung für den Naturschutz in Verbindung gebracht (Badola, Barthwal und Hussain 2012). Die städtische Bevölkerung, die sich möglicherweise mehr auf Erholungsdienstleistungen konzentriert, zeigt andere Präferenzen als die ländliche Bevölkerung, die sich möglicherweise stärker auf die direkten wirtschaftlichen Vorteile dieser Ökosysteme verlässt (Van de Velde et al. 2019). Darüber hinaus sind die Umsetzungsmethode und die Ausgestaltung des Vorteilsausgleichs von entscheidender Bedeutung, um lokale Unterstützung zu gewinnen. Das Vertrauen in lokale Institutionen und transparente Managementpraktiken erhöhen die Akzeptanz von Naturschutzinitiativen (Stone et al. 2008; Badola, Barthwal und Hussain 2012). Die globale Betrachtung von blauem Kohlenstoff hat vor kurzem begonnen, sein Potenzial für die CO₂-Sequestrierung zu erkennen. Allerdings ist zu beachten, dass dieses aufkommende Interesse auch in Konflikt mit lokalen Bedürfnissen und Abhängigkeiten geraten kann.

Globale Initiativen zur Verbesserung der CO₂-Aufnahme durch Blue Carbon Ökosysteme können mit den Lebensgrundlagen lokaler Gemeinschaften kollidieren, die für ihr Überleben auf diese Ökosysteme angewiesen sind. Das Vertrauen in die Governance auf lokaler und globaler Ebene ist für die Akzeptanz von Blue Carbon Strategien von entscheidender Bedeutung. Effektive Regierungsführung, gerechter Vorteilsausgleich und integrative Managementpraktiken können die Unterstützung vor Ort deutlich erhöhen. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass das Vertrauen in Institutionen die Wahrnehmung verschiedener mCDR-Strategien, einschließlich des Blue Carbon Managements, positiv beeinflusst (Badola, Barthwal und Hussain 2012; L'Orange Seigo, Dohle und Siegrist 2014).

Im Allgemeinen wirkt sich die wahrgenommene Natürlichkeit des Blue Carbon Managements erheblich auf seine Akzeptanz aus. Die Kennzeichnung dieser Strategien als natürliche Lösungen erhöht die

öffentliche Unterstützung, da die Menschen dazu neigen, natürliche Ansätze als sicher und nicht zerstörerisch anzusehen. Umgekehrt werden Methoden, die als technisch oder als Eingriffe in die Natur wahrgenommen werden, oft negativer gesehen (Hansen 2006). Diese Vorliebe für natürliche Lösungen deckt sich mit den Erkenntnissen, dass naturbasierte Lösungen wie das Management von blauem Kohlenstoff im Allgemeinen besser akzeptiert werden als technische Eingriffe (Merk et al. 2019). Konflikte zwischen lokalen und globalen Interessen stellen eine große Herausforderung dar. Lokaler Widerstand kann entstehen, wenn globale Bemühungen zur Maximierung der Kohlenstoffbindung durch Blue Carbon Management mit der lokalen Land- und Ressourcennutzung kollidieren. Das [Haida Salmon Restoration Project](#) ist ein Beispiel, bei dem die lokale Unterstützung geteilt war; einige Gemeindemitglieder unterstützten das Projekt aufgrund der dringenden Notwendigkeit von Klimamaßnahmen, während andere es als externe Auferlegung ablehnten (Gannon und Hulme 2018).

Darüber hinaus beeinflussen die wahrgenommene Kontrolle und Eindämmung von mCDR-Methoden die Akzeptanz in der Öffentlichkeit. Strategien, die als kontrollierbar und begrenzt wahrgenommen werden, sind im Allgemeinen eher akzeptabel. Da Blue Carbon Projekte lokalisiert und scheinbar natürlich sind, entsprechen sie tendenziell eher den Präferenzen der Öffentlichkeit im Vergleich zu expansiveren und weniger begrenzten Ansätzen. Es ist jedoch noch unklar, ob Zahlungssysteme, die sich ausschließlich auf die Kohlenstoffbindung in Blue Carbon Ecosystems (BCEs) konzentrieren, angesichts der möglichen Kompromisse mit anderen wichtigen Ökosystemleistungen zu gesellschaftlich optimalen Ergebnissen führen werden. Es ist von entscheidender Bedeutung, Ausgleichsregelungen zu entwerfen, die das gesamte Spektrum der von BCEs erbrachten Ökosystemleistungen berücksichtigen und sicherstellen, dass alle Vor- und Nachteile berücksichtigt und die lokalen Gemeinschaften gerecht entschädigt werden (Merk, Grunau, et al. 2022). Die öffentliche Wahrnehmung von blauem Kohlenstoff als mCDR-Strategie wird durch lokale Abhängigkeiten, soziodemografische Faktoren, das Vertrauen in die Politik und die wahrgenommene Natürlichkeit der Naturschutzbemühungen geprägt. Die Überbrückung der Kluft zwischen lokalen und globalen Perspektiven und die Gewährleistung eines integrativen, transparenten Managements sind für die erfolgreiche Umsetzung und Akzeptanz von Blue Carbon Initiativen von entscheidender Bedeutung. Das Verständnis und die Auseinandersetzung mit diesen differenzierten Wahrnehmungen kann die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von Blue Carbon als Strategie zur Kohlendioxidreduzierung verbessern.

Bewertung nach Dimensionen

Die Bewertung von Blue Carbon Ecosystemen mit Hilfe des ASMASYS Bewertungsrahmens hat das Potenzial und die Unsicherheiten dieser ökosystembasierten CO₂-Sequestrierungsmaßnahmen aufgezeigt. Eine während des 16. TETs geführte Diskussion (25. – 26. September 2023 / Warnemünde) konzentrierte sich auf ein hypothetisches Szenario, das im Herbst 2025 beginnt und die Einrichtung neuer Kelpwälder westlich von Sylt vorsieht. Im Rahmen dieses vierjährigen Experiments sollen die Wirksamkeit bewertet und die Nebenwirkungen überwacht werden, um die Machbarkeit einer Verbesserung der Küstenökosysteme auf lokaler Ebene zur Bindung von CO₂ zu untersuchen.

Technisch-umweltökologische Machbarkeit: Derzeit sind die Infrastruktur und die Technologie, die für Blue Carbon Initiativen, insbesondere für die Kohlenstoffbindung durch Kelp, erforderlich sind, nicht geeignet, da es am Meeresboden keine Felsen gibt, an denen Kelp haften könnte. Dennoch sind andere geophysikalische und chemische Eigenschaften der Umwelt günstig und könnten das Wachstum von Seetang nach Veränderungen des Meeresbodens unterstützen. Die künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Eignung dieser Veränderungen bleiben jedoch ungewiss.

Die **politische Durchführbarkeit** von Blue Carbon Projekten, insbesondere von solchen, die Seetang einbeziehen, erscheint aufgrund ihres vermeintlich „naturbasierten“ Ansatzes plausibel. Der lokale Widerstand könnte jedoch eine große Herausforderung darstellen. Die politische Durchführbarkeit würde wahrscheinlich von der öffentlichen Debatte beeinflusst werden. Angesichts der Sensibilität der Umwelt und der Auswirkungen des Ersetzens eines Ökosystems durch ein anderes oder der wesentlichen Veränderung bestehender Ökosysteme könnten diese Arten von mCDR-Bemühungen

umstritten bleiben. Darüber hinaus kann die politische Durchführbarkeit durch rechtliche Unsicherheiten und mögliche rechtliche Konsequenzen beeinflusst werden.

Rechtliche Machbarkeit: Rechtlich gesehen sind Projekte zur Kohlenstoffbindung durch Seetang zwar theoretisch zulässig, hängen aber von bestimmten Auslegungen ab. Zu diesen Auslegungen gehört, ob Kelp als einheimische Art gilt und ob das Einbringen von Steinen in den Meeresboden als Verklappung oder Wiederherstellung eingestuft wird. Rechtliche Präzedenzfälle, wie z. B. der WWF-Prozess, könnten diese Auslegungen beeinflussen.

Wirtschaftliche Effizienz: Die Kosten und Vorteile von Blue Carbon Initiativen sind weitgehend unbekannt. Die einzigen ermittelten Kosten beziehen sich auf die Produktion und den Vertrieb von grünem Kies. Ein Pilotversuch ist notwendig, um die Kosteneffizienz zu klären, die derzeit aufgrund zahlreicher Unbekannter über die Wirksamkeit dieser Projekte unklar ist.

Wirksamkeit: Es bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Nettoentnahme und der langfristigen Speicherung von CO₂ durch Blue Carbon Projekte. Die Bestimmung der Wirksamkeit wäre ein vorrangiges Ziel aller Versuche, aber die Überwachung und Überprüfung der langfristigen Speicherung stellt eine große Herausforderung dar.

Gerechtigkeit: Die Verteilung von Nutzen und Lasten aus Blue Carbon Projekten muss gerecht sein, wobei die Auswirkungen auf lokale Gemeinschaften, einschließlich Tourismus, Fischerei und kulturelle Dienstleistungen, im Mittelpunkt stehen müssen. Diese Projekte können sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf diese Gemeinschaften haben. Elemente der Verfahrensgerechtigkeit scheinen angesprochen zu werden, aber für eine umfassende Bewertung sind weitere Informationen erforderlich.

Umweltethik: Aus ethischer Sicht sind Blue Carbon Projekte nicht zwangsläufig nachteilig, sondern würden dazu führen, dass ein Ökosystem durch ein anderes ersetzt wird. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Auswirkungen auf zusammenhängende Gebiete zu untersuchen und zu überwachen, um die Beeinträchtigung der Umwelt zu minimieren. Die Gestaltung der Versuchsgebiete sollte darauf abzielen, etwaige negative Auswirkungen zu verringern.

7. Erforschung der marinen Kohlenstoffspeicherung in Deutschland

Das nächste Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand und die öffentliche Diskussion und Wahrnehmung von Methoden der marinen Kohlenstoffspeicherung (mCS). Darüber hinaus enthält es eine kurze Zusammenfassung der Bewertung auf der Grundlage des ASMASYS Bewertungsrahmens, in der die Machbarkeit und Erwünschtheit der einzelnen Methoden bewertet wird. Der ASMASYS Bewertungsrahmen wurde durch die Validierung anhand hypothetischer Testfälle (Kap. 4.4) innerhalb von ASMASYS verfeinert, was auch die Identifizierung der jeder Methode innewohnenden Unsicherheiten ermöglichte.

7.1 mCS in der Tiefseekruste

Methodik, Potenzial und Reifegrad der Technologie

Die marine Kohlenstoffspeicherung in basaltischer Tiefseekruste ist ein innovativer Ansatz zur Verringerung der Kohlendioxidemissionen. Die Idee besteht darin, abgeschiedenes CO₂ in den Porenraum von Basaltgestein unter dem Meeresboden zu transportieren und zu injizieren, wo es mit

dem Gestein reagiert und stabile Karbonatminerale bildet, die das Kohlendioxid im Wesentlichen für geologische Zeiträume einschließen (Bachu, Gunter und Perkins 1994; McGrail et al. 2017). Die basaltische Tiefseekruste bietet potentiell eine enorme Speicherkapazität, und der Mineralisierungsprozess gilt im Vergleich zu herkömmlichen Speichermethoden als sicherer und langlebiger. Auf globaler Ebene ist es unerlässlich, bis Mitte des Jahrhunderts etwa 20 Gt CO₂ pro Jahr dauerhaft zu speichern (IPCC, 2018; P4-Modell), wobei eine drastische Steigerung der derzeitigen mCS-Kapazität angestrebt wird. Der großtechnische Einsatz (Gt-Skala) von mCS ist jedoch nach wie vor nicht verwirklicht, wobei die weltweit bestehenden Anlagen jährlich etwa 40 Mt CO₂ (Snæbjörnsdóttir et al. 2020) abscheiden und speichern, zumeist durch Anwendung konventioneller mCS-Methoden. Seit 2014 hat Carbfix etwa 0,01 Mio t in Wasser gelöstes CO₂ in den unterirdischen Porenraum basaltischer Laven injiziert, wo es mineralisiert und in porösem Gestein unter einem undurchlässigen Deckgestein eingeschlossen wird (Gislason et al. 2010; Matter et al. 2011; Snæbjörnsdóttir et al. 2017; Gunnarsson et al. 2018). Die weltweit in Erwägung gezogene mCS-Technologie schätzt die Speicherkapazitäten entlang mittelozeanischer Rücken durch den Karbonisierungsprozess auf bis zu 100 000-250 000 Gt CO₂, was die Menge des durch die Verbrennung aller fossilen Brennstoffe freigesetzten Kohlendioxids übersteigt (Snæbjörnsdóttir et al. 2020). Dabei handelt es sich um die Reaktion von CO₂ mit Mg-/Ca-Silikatmineralien in Basaltgestein, die zur Bildung von Karbonatmineralien wie Calcit, Dolomit und Magnesit führt.

Öffentliche Debatte und Wahrnehmungen

Im Hinblick auf das internationale Seerecht stellt sich zunächst die Frage, ob Staaten CO₂ in der Tiefseekruste speichern dürfen und wenn ja, wo dies geschehen kann. Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UNCLOS) geht auf diese Frage ein, indem es das Meer in verschiedene Zonen einteilt und die Rechte der Küstenstaaten innerhalb jeder Zone klar definiert. Die Rechtmäßigkeit der Verpressung von CO₂ in den Meeresboden muss von der Frage unterschieden werden, ob das internationale Recht die Ausfuhr von CO₂ in andere Staaten zur Lagerung erlaubt. Artikel 6 des Londoner Protokolls verbietet generell die Ausfuhr von Abfällen zur Verklappung oder Verbrennung auf See oder auf dem Meeresboden. Eine Änderung aus dem Jahr 2009 bezieht sich jedoch speziell auf den grenzüberschreitenden Export von CO₂ zum Zwecke der Speicherung. Da diese Änderung nicht von genügend Staaten ratifiziert wurde, ist sie noch nicht in Kraft getreten. Im Jahr 2019 haben sich die Unterzeichnerstaaten darauf geeinigt, Artikel 6 vorläufig anzuwenden, was von jedem partizipierenden Staat eine eigene Erklärung erfordert.

Bislang haben Belgien, Dänemark, das Königreich der Niederlande, Norwegen, die Republik Korea, Schweden, das Vereinigte Königreich, die Schweiz und Südkorea solche Erklärungen abgegeben, während Finnland seine Erklärung vorbereitet (IMO, 2024). Damit Deutschland abgeschiedenes Kohlendioxid in diese Staaten exportieren kann, muss es ebenfalls eine Erklärung abgeben. Darüber hinaus erfordert die vorläufige Anwendung des geänderten Artikels 6 besondere Vereinbarungen zwischen den exportierenden und importierenden Staaten. Experten sind der Ansicht, dass die rechtlichen Voraussetzungen für die Speicherung und den Export von CO₂ im Meer gegeben sind, dass aber die nationalen Behörden die endgültigen Entscheidungen treffen werden. Für die EU-Mitgliedstaaten erlaubt die EU-Richtlinie zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung die geologische CO₂-Speicherung in ihren Hoheitsgebieten, AWZ und Festlandsockeln gemäß der Definition des UN-Seerechtsübereinkommens, wobei jedes Projekt von der jeweiligen nationalen Behörde genehmigt werden muss.

Bewertung nach Dimensionen

Da für diesen Abschnitt nur begrenzte Informationen zur Verfügung stehen, wird er in einem knapperen Format dargestellt, das es ermöglicht, sich auf die wichtigsten Punkte zu konzentrieren, ohne die hohe Komplexität zu berücksichtigen: Bei der marinen Kohlenstoffspeicherung (mCS) in

basaltischer Tiefseekruste wird das abgeschiedene CO₂ in poröses Basaltgestein unter dem Meeresboden injiziert, wo es reagiert und stabile Karbonatminerale bildet. Dieser Ansatz bietet eine enorme potenzielle Speicherkapazität und eine sicherere, dauerhafte Lösung im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Mit dem ASMASYS Bewertungsrahmen wurden die Machbarkeit und die potenziellen Herausforderungen dieser Technologie bei dem 17. Think and Exchange Tank am 6. und 7. Februar 2024 in Berlin mithilfe eines hypothetischen Textszenarios eingeschätzt. In diesem Szenario, das im Jahr 2028 beginnt und zehn Jahre dauert, geht es um die Injektion und Überwachung von wässrigem CO₂ (aq CO₂) in den Offshore-Flutbasalten des norwegischen Kontinentalrandes, insbesondere in den Becken von Vøring und Møre. Die aus diesem hypothetischen Fall gewonnenen Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung für die Information und Optimierung realer Anwendungen, insbesondere bei der Bestimmung der ökologischen und technologischen Machbarkeit des Projekts, der Fairness, der Gerechtigkeit und des allgemeinen Umgangs mit der natürlichen Welt.

Trotz ihres Potenzials befindet sich die Technologie noch in einem frühen Forschungsstadium und ist für die Anwendung in der Praxis mit großen Unsicherheiten behaftet, wobei die Untersuchungen im Labor- und Pilotmaßstab noch andauern. Die technisch-ökologische Machbarkeit dieses Projekts ist komplex. Zwar sind die Umweltbedingungen günstig und die technologischen Komponenten in unterschiedlichem Umfang verfügbar, doch ist ein erheblicher Ausbau der Infrastruktur erforderlich, und die Technologie ist kostspielig. Der Hauptengpass scheint das Drehkreuz zum Umschlag des Kohlendioxids an der deutschen Küste zu sein, obwohl es Möglichkeiten geben könnte, dieses Problem zu umgehen. Die Entwicklung der Infrastruktur, insbesondere der Drehkreuze, ist von entscheidender Bedeutung und muss frühzeitig in Angriff genommen werden. Für die Bewertung der landgestützten Komponenten sind mehr Informationen erforderlich.

Auf politischer Ebene scheint das Projekt insgesamt durchführbar zu sein, da es keinen starken Widerstand gibt. Dies hängt aber auch vom Umgang mit unvermeidbaren CO₂-Quellen und wirtschaftlichen Belangen wie CO₂-Zertifikaten ab. Die Einbindung von Zementunternehmen könnte die politische Durchführbarkeit erhöhen. In rechtlicher Hinsicht wird davon ausgegangen, dass das Projekt aufgrund der jüngsten Änderungen im deutschen Recht und des Abschlusses der erforderlichen Umweltprüfungen und Genehmigungsverfahren zulässig ist. Wirtschaftlich gesehen bringt das Projekt sowohl Vorteile als auch Nachteile in Form von Kosten mit sich. Zu den Vorteilen gehören der Wissensgewinn und die Möglichkeit, eine führende Rolle in dieser Technologie zu übernehmen. Allerdings sind die Betriebs- und Investitionskosten erheblich. Die Transportkosten stellen ein Problem dar, so dass aus Gründen der Kosteneffizienz alternative Standorte wie Buntsandsteinformationen in Deutschland vorgeschlagen werden. Die Wirksamkeit hängt von den Projekt- und Testergebnissen ab, aber das Konzept ist generell erfolgversprechend. Gerechtigkeitserwägungen heben eine gerechte Verteilung von Nutzen und Lasten hervor, auch wenn die Einzelheiten der politischen Steuerung ungewiss bleiben. Was die Umweltethik betrifft, so scheinen die Auswirkungen des Projekts auf die Natur und den Menschen unter normalen Umständen begrenzt zu sein, wobei die Risiken in erster Linie mit möglichen Leckagen und dem Betrieb auf See zusammenhängen. Die breitere Energieerzeugungskette wird in dieser Bewertung jedoch nicht vollständig berücksichtigt.

7.2 mCS – submarine Speicherung in geologischen Formationen

Methodik, Potenzial und Technologiereifegrad

Die nicht vermeidbaren CO₂-Emissionen der Industrie können durch die Abscheidung und unterirdische Speicherung von CO₂ erheblich reduziert werden. Die technische Realisierung der CO₂-Speicherung umfasst die Entwicklung von Konzepten für den CO₂-Transport von Onshore-Quellen zu Offshore-Speicherstätten und die Injektion in geologische Formationen. Der Aspekt des Transports ist im Gegensatz zur CO₂-Speicherung aus lokal abgetrenntem Gas noch nicht in großem Maßstab umgesetzt worden. Die wichtigsten Speicherkapazitäten in Europa befinden sich in den Sandsteinformationen der Nordsee. In der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) sind die

potenziellen Speicherformationen noch nicht vollständig erforscht, die verfügbaren Daten deuten jedoch auf eine ausreichende Kapazität im tiefen deutschen Nordsee-Untergrund hin (Lozan et al. 2023). Die Gesamtschätzungen reichen von 3,6 bis 10,4 Milliarden Tonnen CO₂ nach Willscher (2007) und 1,9 bis 4,5 Milliarden Tonnen nach Vangkilde-Pedersen et al. (2009), basierend auf nutzbarem Porenvolumen in Sandsteinstrukturen. Mit Hilfe von Computermodellen wird die CO₂-Speicherung an ausgewählten Standorten mit bis zu 10 Millionen Tonnen pro Standort und Jahr simuliert. Die tatsächliche Speicherkapazität wird durch Faktoren wie wirtschaftliche Erwägungen und behördliche Auflagen weiter eingeschränkt.

Öffentliche Debatte und Wahrnehmungen

Im August 2012 hat Deutschland die EU-Richtlinie zu CCS in nationales Recht umgesetzt und mit dem [Kohlenstoffdioxid Speichergesetz](#) strenge Maßnahmen eingeführt. Dieses Gesetz stellt zwei Haupthindernisse für die CO₂-Speicherung in der deutschen Nord- und Ostsee dar: Es schreibt vor, dass Anträge auf Genehmigung von CO₂-Speichern bis Ende 2016 eingereicht werden müssen, und es erlaubt den Bundesländern, Gebiete von der Speicherung auszuschließen. Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben von diesem Recht Gebrauch gemacht und die unterirdische CO₂-Speicherung in ihren Küstenregionen verboten. In einem Evaluierungsbericht aus dem Jahr 2022 wird hervorgehoben, dass der derzeitige Rechtsrahmen die praktische Anwendung von CCS behindert, dass aber CCS- und CCU-Technologien dazu beitragen könnten, dass Deutschland bis 2045 Treibhausgasneutralität erreicht. Die deutsche Regierung diskutiert die Erweiterung und Anpassung des CCS-Gesetzes als Teil einer umfassenderen Carbon Management-Strategie, das darauf abzielt, Anwendungen für CCU und CCS zu identifizieren und die notwendigen wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für ihre schnelle Umsetzung zu entwickeln. Der entsprechende Gesetzentwurf wurde von der Bundesregierung im Juni 2024 vorgelegt ([Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des KSpGs](#)).

Der Entwurf zur Änderung des Klimaschutzgesetzes sieht vor, die CO₂-Speicherung in die nationale Klimapolitik zu integrieren und Speicherziele für die Jahre 2035, 2040 und 2045 festzulegen. Die Bundesregierung hat konkrete Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Klimastrategie skizziert. Deutschland wird die Änderung des Londoner Protokolls ratifizieren, um CO₂-Exporte für die Offshore-Speicherung zu ermöglichen, und wird die notwendigen Änderungen am Hohe-See-Einbringungsgesetz vornehmen. Darüber hinaus muss Deutschland möglicherweise bald an Speicherstätten in anderen EU-Ländern angeschlossen werden, da es in Deutschland keine geeigneten CO₂-Speicheroptionen gibt. Um dies zu ermöglichen, wird Deutschland die entsprechende Änderung des Londoner Protokolls ratifizieren und den nationalen Rechtsrahmen anpassen, um CO₂-Exporte zu Offshore-Speichern zu ermöglichen ([Carbon Management Strategy – BMWK, 2024](#)).

Im März 2023 schlug die EU-Kommission vor, im Rahmen des Net-Zero Industry Act bis 2030 geologische Kapazitäten zur Speicherung von 50 Millionen Tonnen CO₂ zu schaffen, wobei CCS als Brückentechnologie genannt wird (SWP-Berlin, Die Nächste Phase Europäischer Klimapolitik, 2024; SWP-Berlin, Carbon Management Chancen und Risiken für Ambitionierte Klimapolitik; SWP-Berlin, CO₂-Entnahme als Integraler Baustein des Europäischen Green Deal, 2024). Dieser Plan sieht vor, dass die EU-Mitgliedsstaaten Daten über potenzielle CO₂-Speicherstätten veröffentlichen und jährlich über den Projektfortschritt berichten, wobei die Öl- und Gasunternehmen für die Erkundung und Erschließung verantwortlich sind. Die Reaktionen sind gemischt: Befürworter begrüßen CCS, Kritiker betonen die Notwendigkeit, die Treibhausgasproduktion zu reduzieren. Es wird erwartet, dass die laufenden Debatten zu neuen Vorschriften und Gesetzen führen werden, insbesondere in Deutschland. Bundesländer wie Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben die CO₂-Speicherung auf ihrem Gebiet aufgrund kontroverser öffentlicher und politischer Debatten vollständig ausgeschlossen.

In den frühen 2000er Jahren stießen einige CCS-Projekte in Deutschland auf starken Widerstand und wurden aufgegeben (Dütschke 2011; Otto et al. 2022). Die negative Wahrnehmung der Technologie ist nicht nur auf Faktoren zurückzuführen, die mit der Speicherung von CO₂ zusammenhängen, wie etwa die Risikowahrnehmung (L'Orange Seigo, Dohle, und Siegrist 2014), sondern auch auf die Wahrnehmung der Emissionsquelle. Die Speicherung von CO₂ aus biogenen Quellen wird im Vergleich zu Emissionen aus Kohlekraftwerken positiver wahrgenommen (Dütschke et al. 2016; Whitmarsh, Xenias, and Jones 2019; Romanak, Fridahl, and Dixon 2021). Mit der Verlagerung der Debatte von der Verwendung von CCS zur Minderung von Emissionen aus fossilen Brennstoffen auf die Minderung schwer abbaubarer Emissionen oder die ausschließliche Entnahme von Kohlendioxid (Schenuit et al. 2021) änderte sich der Ton in der Mediendarstellung, aber die negative Assoziation mit der fossilen Brennstoffindustrie blieb bestehen (Otto et al. 2022). Anders als die NUMBY-(not-under-my-backyard)-Hypothese vermuten ließe, nehmen die Teilnehmer:innen einer Studie die Offshore-Speicherung nicht positiver wahr als die Onshore-Speicherung (Merk et al. 2022), und der Export von CO₂ zur Speicherung in andere Länder wird negativer gesehen als die Speicherung von CO₂ aus inländischen Anlagen auf heimischem Gebiet (Merk, Nordø, et al. 2022; Merk, Andersen und Nordø 2023).

Die derzeitigen politischen und institutionellen Regelungen unterstützen die Umsetzung der Kohlenstoffspeicherung nicht, so dass sich die geologische Speicherung noch in einem frühen Stadium der politischen Entwicklung befindet. Dies hat auch Auswirkungen auf CDR-Ansätze, die die geologische Speicherung nutzen, nämlich Bioenergie mit CCS (BECCS) und direkte Kohlenstoff-Abscheidung aus der Luft mit anschließender Speicherung (DACCS): Während die Technologie der direkten Kohlenstoff-Abscheidung in der Luft erprobt wird und die Bioenergieerzeugung gut etabliert ist, sind die Möglichkeiten der Kohlenstoffspeicherung begrenzt, was den Einsatz dieser CDR-Methoden in Deutschland einschränkt. Die nationale Klimastrategie schlägt vor, das CCS-Potenzial zu bewerten, fordert aber nicht ausdrücklich die Einführung von BECCS und DACCS. Alle mCDR-Optionen werden im Rahmen der staatlich finanzierten Forschung bewertet.

Bewertung nach Dimensionen

Die Bewertung der marinen Kohlenstoffspeicherung (mCS) im Rahmen von ASMASYS hat sowohl vielversprechendes Potenzial als auch bemerkenswerte Herausforderungen und Unsicherheiten im Zusammenhang mit dieser Technologie aufgezeigt. Im Gegensatz zu anderen Abschnitten, die eher hypothetische Szenarien enthalten, konzentriert sich dieser Teil direkt auf die wichtigsten realen Aspekte. Um mCS effektiv zu implementieren, müssen geeignete Speicherformationen identifiziert und ein detaillierter Aktionsplan entwickelt werden. Dazu gehört die Neubewertung der statischen Speicherkapazität anhand aktueller Daten, die Quantifizierung der dynamischen Speicherkapazitäten, die Bewertung potenzieller Leckagepfade und die Untersuchung der Umweltauswirkungen wie etwa seismischer Lärm auf das Meeresleben. Umweltfreundliche Überwachungsmethoden, wie passive seismische Techniken, werden derzeit entwickelt. Die Wechselwirkungen zwischen der CO₂-Speicherung und anderen Nutzungen müssen aus ökologischer, technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht bewertet werden, und es müssen Strategien zur Lösung potenzieller Konflikte entwickelt werden. Beim 19. ASMASYS Think and Exchange Tank am 23. Mai 2024 lag der Schwerpunkt der Diskussion auf mCS in Sandsteinformationen in der Nordsee, wie sie im Projekt GEOSTOR untersucht wurden. Diese Bewertung wurde ohne die Einbeziehung von Interessenvertretern durchgeführt, da dieser Abschnitt weniger hypothetisch ist (höherer TRL). Außerdem wurde der Dialog mit den Interessenvertreter:innen bereits im Rahmen der GEOSTOR-Aktivitäten geführt und die Ergebnisse beim 17. TET dokumentiert.

Technisch-umweltökologische Machbarkeit: Geeignete Flächen und geologische Formationen für die Speicherung sind vorhanden, allerdings sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die örtlichen geophysikalischen und chemischen Bedingungen sind geeignet, doch sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die erforderlichen Technologien befinden sich auf einem Technology Readiness Level von 8-9. Die Infrastruktur für die deutsche Industrie muss noch aufgebaut werden, während die

norwegische Infrastruktur kurz vor der Fertigstellung steht. Zu den technischen Mitteln zur Beherrschung potenzieller Unfälle gehören die Unterbrechung der Injektionen, die Versiegelung und die Druckentlastung (z. B. durch Grundwasserabfluss). Materialien für mCS-Aktivitäten sind verfügbar, und obwohl sie materialintensiv sind, wird die Verfügbarkeit nicht als Problem angesehen. Derzeit gibt es keine ausreichenden kohlenstoffarmen Energiequellen für die Kohlenstoff-Abscheidung, so dass erneuerbare Energien eingesetzt werden müssen. Spezialisierte Fachkräfte, vor allem aus der Erdölindustrie, sind verfügbar, und wenn sie nicht vor Ort verfügbar sind, können qualifizierte Arbeitskräfte eingestellt werden.

Politische Durchführbarkeit: Die politische Durchführbarkeit ist positiv bewertet und wird mehrheitlich unterstützt, auch wenn es noch offene Fragen und rechtliche Unklarheiten gibt. Die von der Regierung bis 2019 geförderte Forschung konzentrierte sich vor allem auf landgestützte Methoden. Das GEOSTOR-Projekt war die erste Meeresinitiative. CCS ist in die EU- und nationale Klimapolitik integriert und wird von den meisten deutschen Parteien mit Ausnahme von Die Linke und AfD unterstützt. Die öffentliche Akzeptanz ist mäßig, mit einigen NIMBY-Bedenken, insbesondere für die Offshore-Speicherung in der Nähe deutscher Inseln.

Rechtliche Durchführbarkeit: Derzeit sind Genehmigungsanträge für CCS in Deutschland nicht möglich, aber es gibt Bestrebungen zur Legalisierung ([Kohlenstoffdioxid Speichergesetz, KSpG – vom 17. August 2012](#); [Entwurf zur Änderung KSpG – vom 21 Juni 2024](#)). Eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist erforderlich, wobei die konkrete Rechtsgrundlage unklar ist. Zur Bewertung der Umweltüberwachung sind Scoping-Studien geplant. Alternative Optionen für schwer abbaubare Emissionen sind begrenzt, so dass CCS zum Ausgleich erforderlich ist. Die Öffentlichkeit muss einbezogen werden, und es besteht die Möglichkeit, Einspruch zu erheben und zu klagen. Die Umsetzung von CCS ist derzeit verboten, da sie als gefährlich eingestuft wird. Es gibt keine direkten Präzedenzfälle, aber neue Technologien bieten Anhaltspunkte. CCS-Anwendungen überschneiden sich nicht mit den Eigentumsrechten indigener Völker, aber Pipelines, die etwa durch den *Nationalpark Wattenmeer* verlaufen, geben Anlass zu Bedenken.

Wirtschaftliche Effizienz: Die Option ist mit hohen Kosten und der Notwendigkeit von Subventionen verbunden und könnte nur bei einer Verdoppelung des EU-ETS-Preises wirtschaftlich rentabel werden. Die Grenzkosten für die Beseitigung liegen bei 150 bis 250 EUR pro Tonne CO₂ (Schätzung: Mai 2024), wobei die Hoffnung auf Kostensenkungen besteht. Die Option ist nicht extrem ressourcenintensiv, wird aber Platz für Pipelines und unterirdische Nutzung beanspruchen. Es wird mit technologischen Fortschritten gerechnet, aber die Kosten werden hoch bleiben. Es fallen öffentliche Transaktionskosten an, aber keine zusätzlichen privaten Transaktionskosten außer den Produktionskosten. Über einen Zeitraum von 30 Jahren sind die Investitionskosten geringer als die Betriebskosten, aber die Investitionen sind sehr spezifisch und haben keinen Zusatznutzen. Die Einnahmerisiken sind hoch, da die Kosten die Einnahmen durch das EU-ETS übersteigen und Subventionen erforderlich machen. Es gibt keine nennenswerten monetarisierten Schäden oder Vorteile für dritte Akteure.

Wirksamkeit: Die mCDR/mCS-Option ist für die langfristige Speicherung hocheffektiv und hat ein erhebliches Potenzial, auch wenn es Zeit braucht, um sie zu skalieren. Sie kann 20-40 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in der deutschen AWZ speichern, wobei die volle potenzielle Wirksamkeit in etwa zehn Jahren erreicht wird. Andere Nicht- CO₂-Treibhausgase werden bei dieser Methode nicht entfernt. Die Lebenszyklusemissionen sind aufgrund des hohen Energiebedarfs erheblich, hängen jedoch von der Energiequelle ab, die zum Zeitpunkt der Umsetzung der Option größtenteils erneuerbar sein könnte. Das Reservoir für die Kohlenstoffbindung funktioniert in geologischen Zeiträumen, im Wesentlichen für immer. Das Risiko von Speicherlecks ist bei guter Regulierung gering, da über 99 % des CO₂ gespeichert bleiben. Benutzerfehler sind möglich, aber unwahrscheinlich. Die Netto- CO₂-Entnahme wird mit geringen Unsicherheiten überwacht. Die CCS-Aktivität verursacht keine indirekten Änderungen der saisonalen CO₂-Flüsse oder der regionalen Albedo. Sobald die Aktivität beendet ist, bleibt das CO₂ gespeichert.

Gerechtigkeit: Relevante Informationen über CCS-Aktivitäten sind öffentlich zugänglich. Die Betroffenen können sich an der Entscheidungsfindung beteiligen, wobei demokratisch gewählte Gremien in jeder Phase einbezogen werden. Industrielärm, der durch seismische Explorationen, Schiffsaktivitäten und den Bau von Unterwasserpipelines entsteht, kann Schweinswale beeinträchtigen. Die CCS-Methode hat keine Auswirkungen auf die lokale Verfügbarkeit von Süßwasser. Für die Verlegung einer Pipeline wird nur minimaler Platz auf dem Meeresboden benötigt, jedoch deutlich mehr Raum in den tieferen Gesteinsschichten und für den Bau von Hubs an der Küste. Konflikte mit der Nutzung von Meeresgebieten werden durch die Raumplanung geregelt. Die Tätigkeit ist gesundheitlich unbedenklich und schafft neue Arbeitsplätze, insbesondere in der Öl- und Gasindustrie, ohne die bestehenden zu gefährden. Sie beeinträchtigt die Bereitstellung von Ökosystemen oder kulturellen Dienstleistungen nicht wesentlich. Die Umweltauswirkungen werden durch die vorgeschriebenen Umweltverträglichkeitsprüfungen überwacht, und es werden keine unbekanntes Auswirkungen erwartet. Mit Ausnahme eines möglichen Anstiegs der Zementpreise gibt es keine zusätzlichen Auswirkungen auf den Menschen. Es gibt keine spezifischen Belastungen für den Globalen Süden, und die Verteilung der Belastungen auf nationaler oder europäischer Ebene ist nicht festgelegt.

Umweltethik: Diese Technologie hat aufgrund möglicher kleinerer Leckagen nur minimale Auswirkungen auf die Natur. Die lokale biologische Vielfalt kann im Falle kleinerer Leckagen in einem Bereich von etwa 50 m² um eine Leckage herum beeinträchtigt werden, aber es wird kein Aussterben erwartet. Die Luftqualität und die Qualität des Oberflächenwassers werden sich nicht verändern. Der pH-Wert in Bodennähe kann sinken, und die Qualität der Sedimente und des Bodenwassers kann sich im Falle von Leckagen verändern. Die lokale Ozeanzirkulation, die Primärproduktion und die Dynamik des Nahrungsnetzes werden nicht beeinträchtigt, außer lokal im Falle von Leckagen. Pipelines können die Biosphäre des Meeresbodens und die Integrität von Lebensräumen in bis zu 2 km Tiefe (tiefe Biosphäre) beeinträchtigen. Immobiler Organismen im Umkreis von 50 m² können absterben. Es besteht kein erhöhtes Risiko für invasive Arten, und es wird erwartet, dass sich die Ökosysteme anpassen, wobei CO₂-tolerante Arten überwiegen. Das Funktionieren des Ökosystems insgesamt wird nicht wesentlich beeinträchtigt. Nach Beendigung der Aktivitäten wird sich die Situation normalisieren. Es wird keine Auswirkungen auf das lokale Klima oder einen Einfluss auf regulierende Dienstleistungen wie Luftreinigung, Klimaregulierung und Küstenerosionsschutz geben.

8. Zusammenfassung

Das Projekt ASMASYS (Unified ASsessment framework for proposed methods of MARine CDR and interim knowledge SYnthesiS) hat umfassende Einblicke in die Bewertung von Technologien zur marinen Kohlendioxid-Abscheidung (mCDR) und zur marinen Kohlenstoffspeicherung (mCS) geliefert und dabei sowohl großes Potenzial als auch Herausforderungen aufgezeigt. Unsere Bewertungsergebnisse unterstreichen die entscheidende Bedeutung detaillierter Kenntnisse und solider Annahmen bei der Bewertung der Machbarkeit und Zweckmäßigkeit, einschließlich der potenziellen Auswirkungen der bewerteten Optionen. Die Think and Exchange Tanks zu spezifischen Testszenarien können als unterstützende Instrumente bei der Bewältigung der hohen Nachfrage und der Ungewissheit im Zusammenhang mit diesen Technologien fungieren und entscheidende Einblicke in standortspezifische Potenziale und begrenzende Faktoren liefern.

Der Hauptzweck des ASMASYS Bewertungsrahmens besteht darin, breitere Debatten darüber zu führen, welche mCDR/mCS-Optionen in den allgemeinen politischen Strategien zur Reaktion auf den Klimawandel eine Rolle spielen *könnten* und welche mCDR/mCS-Optionen eine Rolle spielen *sollten*. Er bietet jedoch keine Möglichkeit, diese Debatten zu entscheiden; keine Formel, die den Akteuren sagt, was zu tun ist. Aber die relevanten Themen und Fragen, die Entscheidungsträger und letztlich die breite Öffentlichkeit bei ihren Entscheidungen berücksichtigen sollten, sind im Bewertungsrahmen gesammelt und strukturiert aufbereitet. Es bietet den relevanten Akteur:innen Hilfestellung bei der

Entwicklung ihrer eigenen Perspektiven zu mCDR/mCS, anstatt eine vorgefertigte Perspektive zu bieten. Sein Anwendungsbereich ist insofern ganzheitlich, als er darauf abzielt, diese Unterstützung in verschiedenen Phasen der Entwicklung und Umsetzung von mCDR/mCS anzubieten. Er kann sowohl dazu dienen, die Möglichkeit und die Vorzüge eines kleinen Forschungsprojekts als auch die Möglichkeit und die Vorzüge einer massiven mCDR/mCS-Implementierungsstrategie zu bewerten – und die offenen Fragen und Unsicherheiten aufzuzeigen, mit denen wir in beiden Fällen konfrontiert sind. Außerdem sollte er breit genug sein, um verschiedene mCDR/mCS-Methoden abzudecken und dabei zu helfen, ihre Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu bewerten. Der Schlüssel zum Erreichen einer solchen Breite ist die bewusste Vermeidung einer Rangfolge oder eines Gewichtungssystems, das den Nutzern vorschreibt, wie die einzelnen Urteile zu verschiedenen Kriterien und Dimensionen zu beurteilen sind. Solche Formeln sind, wenn überhaupt, nur dann überzeugend, wenn sie für bestimmte Bewertungsobjekte unter bestimmten Umständen konzipiert sind. Durch die „bloße“ Erfassung und Strukturierung der Themen und Fragen einer Bewertung kann der ASMASYS Bewertungsrahmen zur Bewertung einer weitaus größeren Vielfalt von mCDR/mCS-Optionen verwendet werden.

In der zukünftigen Arbeit wollen wir die Kriterien weiter verallgemeinern, um verschiedene Optionen zur Eindämmung und zum Geoengineering zu bewerten und zu vergleichen. Wir haben die Gesamtstruktur des Bewertungsrahmens so konzipiert, dass dies möglich ist. Ein übergreifendes Ergebnis ist, dass es erhebliche Wissenslücken gibt, die eine abschließende Bewertung von mCDR- und mCS-Optionen oft ausschließen. Wir sehen dies nicht als Beweis dafür, dass ein Bewertungsrahmen für diese Optionen von eher begrenztem Nutzen ist. Vielmehr zeigt der Rahmen auf, welche (Art von) Informationen für eine abschließende Bewertung fehlen, und hilft so, künftige Forschung und Entscheidungen über Möglichkeiten der Forschungsfinanzierung zu lenken.

Während Effizienz- und Machbarkeitsbewertungen von zentraler Bedeutung sind, um zu entscheiden, ob Wiederherstellungsprojekte unter den Rahmen für die Kohlendioxid-Entnahme (CDR) fallen, liegt der Schwerpunkt von ASMASYS weiterhin auf der Erforschung praktikabler mCDR/mCS-Anwendungen, die sich von der Wiederherstellung von Ökosystemen unterscheiden.

Mit Blick auf die Zukunft versprechen neue konzeptionelle Richtungen in der Forschung zu Bewertungsrahmen, einschließlich Erkenntnissen aus den Sozialwissenschaften und philosophischen Überlegungen, eine Bereicherung künftiger Bewertungen. Darüber hinaus könnte eine eingehendere Untersuchung der aktuellen EU- und deutschen Umweltstandards die bestehenden Kriterien und Indikatoren für die Bewertung von Umweltauswirkungen verbessern und so einen soliden Rahmen für künftige Bewertungen gewährleisten. Durch das Aufzeigen von Wegen für künftige Forschung und die Betonung der Bedeutung von methodischer Strenge und fundierter Entscheidungsfindung schafft dieses Projekt eine Grundlage für nachhaltige Klimaschutzmaßnahmen in den kommenden Jahren.

9. Danksagung

Wir möchten den Mitwirkenden des Nationalen Expert:innen-Forums der Forschungsmission CDRmare und ihren Kolleg:innen, die einen wesentlichen Beitrag zum ASMASYS Projekt geleistet haben, unseren aufrichtigen Dank aussprechen. Ihre unschätzbare Unterstützung und Einblicke während der spezifischen Think and Exchange Tanks und ihre Beiträge zu diesem ASMASYS Synthesebericht waren für unsere Fortschritte von entscheidender Bedeutung. Unser besonderer Dank geht an Dr. Ulrike Doering, Dr. Barbara Bauer, und Dr. Wera Leujak vom Umweltbundesamt (UBA); Dr. Heike Lippert vom Bundesamt für Naturschutz (BfN); Jörg Rüger und Dr. Sebastian Fischer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK); Ulrich Scheffler vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Dr. Finn A. Viehberg vom World Wide Fund for Nature (WWF); und Dirk Walther von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Ihr Fachwissen und ihr Engagement haben dieses Projekt bereichert. Wir wissen ihre Beiträge sehr zu schätzen.

10. Glossar

COP21	21st Conference of the Parties (UN-Klimakonferenz in Paris 2015)
AWL	Accelerated weathering of limestone (Beschleunigte Verwitterung von Kalkstein)
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
BC	Blue Carbon (Blauer Kohlenstoff)
BCEs	Blue Carbon Ecosystems (Ökosysteme des blauen Kohlenstoffs)
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (Kohlenstoff-Abscheidung und -nutzung)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}	Kohlenstoffdioxid Äquivalente
CDR	Carbon Dioxide Removal (Kohlenstoffdioxid Entnahme)
KSpG	Kohlenstoffdioxid-Speicherungsgesetz
CMS	Carbon Management-Strategie
DACCS	Direkte Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff in der Luft
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
EU ETS	EU Emissions Trading System (Europäischer Emissionshandel)
AWZ	Ausschließlichen Wirtschaftszone
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klima
KSG	Klimaschutzgesetz
THG	Treibhausgas
HSEG	Hohe-See-Einbringungsgesetzes
ICM	Industrielles Carbon Management
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatliche Sachverständigenrat für Klimaänderungen)
IMO	International Maritime Organization (Internationale Seeschifffahrts-Organisation)
LOHAFEX	Iron Fertilization Experiment (Experiment zur Eisendüngung des Ozeans)
LCA	life cycle assessment (Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse)

LNe	Langfriststrategie	Negativemissionen	zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen
mCDR	marine Carbon Dioxide Removal (marine Kohlenstoffdioxid-Entnahme)		
mCS	marine Carbon Storage (marine Kohlenstoffdioxid-Speicherung)		
CH ₄	Methan		
Mt/yr	Megatonnen pro Jahr		
MRV	Monitoring, Reporting, Verification (Überwachung, Berichterstattung, Verifizierung)		
NETs	Negative Emissions Technologien		
NZIA	Net Zero Industry Act (Netto-Null-Industrie-Gesetz)		
N ₂ O	Distickstoffmonoxid		
NGOs	Non-Governmental Organization (Nichtregierungsorganisation)		
NIMBY	Not In My BackYard (nicht in meinem Hinterhof)		
OAE	Ocean Alkalinity Enhancement (Alkalinitätserhöhung im Ozean)		
SWP-Berlin	Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP)		
TRLs	Technology Readiness Levels (Technologie-Reifegrad)		
Tg C	Terragram Kohlenstoffdioxid		
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea (UN-Seerechtsübereinkommen)		
WWF	World Wide Fund For Nature		

11. Links/Protokolle/Pressemitteilungen

<https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2024/05/20240529-cabinet-clears-path-for-ccs-in-germany.html>

<https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2024/05/20240529-cabinet-clears-path-for-ccs-in-germany.html>

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-der-bundesregierung-fuer-eine-carbon-management-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.html>

<https://www.bmuv.de/faqs/kohleausstiegsgesetz>

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/lpamended2006.pdf>

<https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/>

<https://dserver.bundestag.de/btd/20/119/2011900.pdf>

<https://www.gesetze-im-internet.de/hoheseeeinbrg/>

<https://www.theguardian.com/uk-news/2023/apr/17/protesters-urge-caution-over-st-ives-climate-trial-amid-chemical-plans-for-bay-planetary-technologies>

<https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240223IPR18078/nature-restoration-parliament-adopts-law-to-restore-20-of-eu-s-land-and-sea>

<https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/kurzgutachten-im-rahmen-der-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>

12. Referenzen

- Amelung, Dorothee, and Joachim Funke. 2015. "Laypeople's Risky Decisions in the Climate Change Context: Climate Engineering as a Risk-Defusing Strategy?" *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 21 (2): 533–59. <https://doi.org/10.1080/10807039.2014.932203>.
- Andersen, Gisle, Christine Merk, and Endre Tvinnereim. 2023. "Synthesis Report on Public Perceptions from WP 3," *OceanNets Deliverable*, , December, 9. https://doi.org/10.3289/oceannets_d3.6.
- Bach, Lennart Thomas. 2024. "The Additionality Problem of Ocean Alkalinity Enhancement." *Biogeosciences* 21 (1): 261–77. <https://doi.org/10.5194/bg-21-261-2024>.
- Bachu, Stefan, W. D. Gunter, and E. H. Perkins. 1994. "Aquifer Disposal of CO₂: Hydrodynamic and Mineral Trapping." *Energy Conversion & Management* 35 (4): 269–79. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90060-4).
- Badola, Ruchi, Shivani Barthwal, and Syed Ainul Hussain. 2012. "Attitudes of Local Communities towards Conservation of Mangrove Forests: A Case Study from the East Coast of India." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 96 (January): 188–96. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.016>.
- Bertram, Christine, and Christine Merk. 2020. "Public Perceptions of Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: The Nature-Engineering Divide?" *Frontiers in Climate* 2 (December). <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.594194>.
- BMWK – Eckpunktepapier LNe. n.d. "Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe)." BMWI. Accessed May 27, 2024. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.html>.
- Boettcher, Miranda, Kerryn Brent, Holly Jean Buck, Sean Low, Duncan McLaren, and Nadine Mengis. 2021. "Navigating Potential Hype and Opportunity in Governing Marine Carbon Removal." *Frontiers in Climate* 3 (June). <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.664456>.
- Boettcher, Miranda, Felix Schenuit, and Oliver Geden. 2023. "The Formative Phase of German Carbon Dioxide Removal Policy: Positioning between Precaution, Pragmatism and Innovation." *Energy Research & Social Science* 98 (April): 103018. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103018>.
- Borchers, Malgorzata, Johannes Förster, Daniela Thrän, Silke Beck, Terese Thoni, Klaas Korte, Erik Gawel, et al. 2024. "A Comprehensive Assessment of Carbon Dioxide Removal Options for Germany." *Earth's Future* 12 (5). <https://doi.org/10.1029/2023ef003986>.
- Boysen, Lena R., Wolfgang Lucht, Dieter Gerten, Vera Heck, Timothy M. Lenton, and Hans Joachim Schellnhuber. 2017. "The Limits to Global-warming Mitigation by Terrestrial Carbon Removal." *Earth's Future* 5 (5): 463–74. <https://doi.org/10.1002/2016ef000469>.
- Buck, Holly Jean, Wim Carton, Jens Friis Lund, and Nils Markusson. 2023. "Why Residual Emissions Matter Right Now." *Nature Climate Change* 13 (4): 351–58. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01592-2>.
- Carbon Management Strategy – BMWK, 2024. n.d. "Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie." BMWI. Accessed May 27, 2024. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.html>.
- Cox et al. 2020. "Public Perceptions of Carbon Dioxide Removal in the United States and the United Kingdom." *Nature Climate Change* 10 (8): 744–49. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0823-z>.
- Cyronak, Tyler, Rebecca Albright, and Lennart T. Bach. 2023. "Field Experiments in Ocean Alkalinity Enhancement Research." *State of the Planet 2-oae2023* (November): 1–13. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-7-2023>.
- Dütschke, Elisabeth. 2011. "What Drives Local Public acceptance—Comparing Two Cases from Germany." *Energy Procedia* 4 (January): 6234–40. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.636>.
- Dütschke, Elisabeth, Katharina Wohlfarth, Samuel Höller, Peter Viebahn, Diana Schumann, and Katja Pietzner. 2016. "Differences in the Public Perception of CCS in Germany Depending on CO₂ Source, Transport Option and Storage Location." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 53 (October): 149–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.07.043>.
- Eisaman, Matthew D., Sonja Geilert, Phil Renforth, Laura Bastianini, James Campbell, Andrew W. Dale, Spyros Foteinis, et al. 2023. "Assessing the Technical Aspects of Ocean-Alkalinity-Enhancement Approaches." *State of the Planet 2-oae2023* (November): 1–29. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-3-2023>.
- Feng, E. Y., W. Koeve, D. P. Keller, and A. Oschlies. 2017. "Model-Based Assessment of the CO₂ Sequestration Potential of Coastal Ocean Alkalinization." *Earth's Future* 5 (12): 1252–66. <https://doi.org/10.1002/2017ef000659>.
- Figueiredo, M. A. de, D. M. Reiner, and H. J. Herzog. 2003. "- Ocean Carbon Sequestration: A Case Study in Public and Institutional Perceptions." In *Greenhouse Gas Control Technologies – 6th International Conference*, edited by J. Gale and Y. Kaya, 799–804. Oxford: Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-008044276-1/50126-4>.
- Foteinis, Spyros, John Andresen, Francesco Campo, Stefano Caserini, and Phil Renforth. 2022. "Life Cycle Assessment of Ocean Liming for Carbon Dioxide Removal from the Atmosphere." *Journal of Cleaner Production* 370 (October): 133309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133309>.

- Foteinis, Spyros, James S. Campbell, and Phil Renforth. 2023. "Life Cycle Assessment of Coastal Enhanced Weathering for Carbon Dioxide Removal from Air." *Environmental Science & Technology* 57 (15): 6169–78. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08633>.
- Fuhr, Michael, Klaus Wallmann, Andrew W. Dale, Habeeb Thanveer Kalapurakkal, Mark Schmidt, Stefan Sommer, Christian Deusner, Timo Spiegel, Jannes Kowalski, and Sonja Geilert. 2024. "Alkaline Mineral Addition to Anoxic to Hypoxic Baltic Sea Sediments as a Potentially Efficient CO₂-Removal Technique." *Frontiers in Climate* 6. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1338556>.
- Fuss, Sabine, Josep G. Canadell, Glen P. Peters, Massimo Tavoni, Robbie M. Andrew, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, et al. 2014. "Betting on Negative Emissions." *Nature Climate Change* 4 (10): 850–53. <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>.
- Gannon, Kate Elizabeth, and Mike Hulme. 2018. "Geoengineering at the 'Edge of the World': Exploring Perceptions of Ocean Fertilisation through the Haida Salmon Restoration Corporation." *Geo: Geography and Environment* 5 (1): e00054. <https://doi.org/10.1002/geo2.54>.
- Gattuso, Jean-Pierre, Phillip Williamson, Carlos M. Duarte, and Alexandre K. Magnan. 2021. "The Potential for Ocean-Based Climate Action: Negative Emissions Technologies and beyond." *Frontiers in Climate* 2 (January). <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.575716>.
- Geden, Oliver. 2016. "The Paris Agreement and the Inherent Inconsistency of Climate Policymaking." *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change* 7 (6): 790–97. <https://doi.org/10.1002/wcc.427>.
- Gislason, Sigurdur Reynir, Domenik Wolff-Boenisch, Andri Stefansson, Eric H. Oelkers, Einar Gunnlaugsson, Hólmfrídur Sigurdardóttir, Bergur Sigfusson, et al. 2010. "Mineral Sequestration of Carbon Dioxide in Basalt: A Pre-Injection Overview of the CarbFix Project." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (3): 537–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>.
- Gunnarsson, Ingvi, Edda S. Aradóttir, Eric H. Oelkers, Deirdre E. Clark, Magnús Þór Arnarson, Bergur Sigfusson, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, et al. 2018. "The Rapid and Cost-Effective Capture and Subsurface Mineral Storage of Carbon and Sulfur at the CarbFix2 Site." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 79 (December): 117–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>.
- Hansen, Anders. 2006. "Tampering with Nature: 'nature' and the 'natural' in Media Coverage of Genetics and Biotechnology." *Media Culture & Society* 28 (6): 811–34. <https://doi.org/10.1177/0163443706067026>.
- Hartmann, J., Niels Suitner, C. Lim, J. Schneider, Laura Marín-Samper, J. Arístegui, P. Renforth, J. Taucher, and U. Riebesell. 2023. "Stability of Alkalinity in Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) Approaches – Consequences for Durability of CO₂ Storage." *Biogeosciences*, February. <https://doi.org/10.5194/bg-20-781-2023>.
- He, Jing, and Michael D. Tyka. 2023. "Limits and CO₂ Equilibration of near-Coast Alkalinity Enhancement." *Biogeosciences* 20 (1): 27–43. <https://doi.org/10.5194/bg-20-27-2023>.
- Ho, David T., Laurent Bopp, Jaime B. Palter, Matthew C. Long, Philip W. Boyd, Griet Neukermans, and Lennart T. Bach. 2023. "Monitoring, Reporting, and Verification for Ocean Alkalinity Enhancement." *State of the Planet 2-oe2023* (November): 1–12. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-12-2023>.
- Jakovac, Catarina C., Agnieszka Ewa Latawiec, Eduardo Lacerda, Isabella Leite Lucas, Katarzyna Anna Korys, Alvaro Iribarrem, Gustavo Abreu Malaguti, R. Kerry Turner, Tiziana Luisetti, and Bernardo Baeta Neves Strassburg. 2020. "Costs and Carbon Benefits of Mangrove Conservation and Restoration: A Global Analysis." *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics* 176 (October): 106758. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106758>.
- Jewell, Jessica, and Aleh Cherp. 2020. "On the Political Feasibility of Climate Change Mitigation Pathways: Is It Too Late to Keep Warming below 1.5°C?" *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change* 11 (1). <https://doi.org/10.1002/wcc.621>.
- Keller, David P., Andrew Lenton, Emma W. Littleton, Andreas Oschlies, Vivian Scott, and Naomi E. Vaughan. 2018. "The Effects of Carbon Dioxide Removal on the Carbon Cycle." *Current Climate Change Reports* 4 (3): 250–65. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0104-3>.
- Köhler, Peter, Jesse F. Abrams, Christoph Völker, Judith Hauck, and Dieter A. Wolf-Gladrow. 2013. "Geoengineering Impact of Open Ocean Dissolution of Olivine on Atmospheric CO₂, Surface Ocean pH and Marine Biology." *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]* 8 (1): 014009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014009>.
- Lamb, William F., Gregory F. Nemet, Thomas Gasser, Jose Maria Valenzuela, Sarah Lueck, Carter Powis, Steve Smith, et al. 2023. "State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition." Center For Open Science. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>.
- Lee, Hoesung, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne, Christopher Trisos, et al. 2023. "IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland." In IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., 42. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

- López-Medellín, Xavier, Alicia Castillo, and Exequiel Ezcurra. 2011. "Contrasting Perspectives on Mangroves in Arid Northwestern Mexico: Implications for Integrated Coastal Management." *Ocean & Coastal Management* 54 (4): 318–29. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.12.012>.
- L'Orange Seigo, Selma, Simone Dohle, and Michael Siegrist. 2014. "Public Perception of Carbon Capture and Storage (CCS): A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (October): 848–63. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.017>.
- Low, Sean, and Miranda Boettcher. 2020. "Delaying Decarbonization: Climate Governmentalities and Sociotechnical Strategies from Copenhagen to Paris." *Earth System Governance* 5 (September): 100073. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2020.100073>.
- Lozan, J. L., H. Graßl, S-W Breckle, D. Kasang, and M. Quante. 2023. "CCS (Carbon Capture and Storage): CO₂-Speicherung Unter Der Nordsee." In *Warnsignal Klima*, edited by J. L. Lozan, H. Graßl, S-W Breckle, D. Kasang, and M. Quante, 120–25. Hamburg, Germany: Wissenschaftliche Auswertungen. <https://doi.org/10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.17>.
- Lueck, Sarah, Rob Bellamy, Tim Repke, Finn Müller-Hansen, Emily Cox, and William F. Lamb. 2024. "Chapter 6: Perceptions and Communication, the State of Carbon Dioxide Removal – 2nd Edition." OSF. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/QN6FV>.
- Macreadie, Peter I., Micheli D. P. Costa, Trisha B. Atwood, Daniel A. Friess, Jeffrey J. Kelleway, Hilary Kennedy, Catherine E. Lovelock, Oscar Serrano, and Carlos M. Duarte. 2021. "Blue Carbon as a Natural Climate Solution." *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (12): 826–39. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>.
- Marmier, Alain. 2023. *Decarbonisation Options for the Cement Industry*. <https://doi.org/10.2760/174037>.
- Matter, Juerg M., W. S. Broecker, S. R. Gislason, E. Gunnlaugsson, E. H. Oelkers, M. Stute, H. Sigurdardóttir, et al. 2011. "The CarbFix Pilot Project—Storing Carbon Dioxide in Basalt." *Energy Procedia* 4 (January): 5579–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.546>.
- McGrail, B. Peter, Herbert T. Schaefer, Frank A. Spang, John B. Cliff, Odeta Qafoku, Jake A. Horner, Christopher J. Thompson, Antoinette T. Owen, and Charlotte E. Sullivan. 2017. "Field Validation of Supercritical CO₂ Reactivity with Basalts." *Environmental Science & Technology Letters* 4 (1): 6–10. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00387>.
- Mengis, Nadine, Allanah Paul, and Mar Fernández-Méndez. 2023. "Counting (on) Blue carbon—Challenges and Ways Forward for Carbon Accounting of Ecosystem-Based Carbon Removal in Marine Environments." *PLOS Climate* 2 (8): e0000148. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000148>.
- Merk, Christine, Gisle Andersen, and Endre Tvinnereim. 2023. "Report on Public Perceptions in Cross-Country Survey," *OceanNets Deliverable*, September, 34. https://doi.org/10.3289/oceannets_d3.5.
- Merk, Christine, G. Andersen, and Åsta Dymes Nordø. 2023. "Carbon Capture and Storage – Publics in Five Countries around the North Sea Prefer to Do It on Their Own Territory." <https://www.econstor.eu/handle/10419/273361>.
- Merk, Christine, Jonas Grunau, Marie-Catherine Riekhof, and Wilfried Rickels. 2022. "The Need for Local Governance of Global Commons: The Example of Blue Carbon Ecosystems." *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics* 201 (November): 107581. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107581>.
- Merk, Christine, Geraldine Klaus, Julia Pohlers, Andreas Ernst, Konrad Ott, and Katrin Rehdanz. 2019. "Public Perceptions of Climate Engineering: Laypersons' Acceptance at Different Levels of Knowledge and Intensities of Deliberation." *GAIA* 28 (4): 348–55. <https://doi.org/10.14512/gaia.28.4.6>.
- Merk, Christine, Åsta Dymes Nordø, Gisle Andersen, Ole Martin Lægneid, and Endre Tvinnereim. 2022. "Don't Send Us Your Waste Gases: Public Attitudes toward International Carbon Dioxide Transportation and Storage in Europe." *Energy Research & Social Science* 87 (May): 102450. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102450>.
- Moran, Damian. 2010. "Carbon Dioxide Degassing in Fresh and Saline Water. I: Degassing Performance of a Cascade Column." *Aquacultural Engineering* 43 (1): 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.05.001>.
- Myatt, L. B., M. D. Scrimshaw, and J. N. Lester. 2003. "Public Perceptions and Attitudes towards an Established Managed Realignment Scheme: Orplands, Essex, UK." *Journal of Environmental Management* 68 (2): 173–81. [https://doi.org/10.1016/s0301-4797\(03\)00065-3](https://doi.org/10.1016/s0301-4797(03)00065-3).
- Nawaz, Sara, Javier Lezaun, Jose Maria Valenzuela, and Phil Renforth. 2023. "Broaden Research on Ocean Alkalinity Enhancement to Better Characterize Social Impacts." *Environmental Science & Technology* 57 (24): 8863–69. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09595>.
- Nawaz, Sara, Guillaume Peterson St-Laurent, and Terre Satterfield. 2023. "Public Evaluations of Four Approaches to Ocean-Based Carbon Dioxide Removal." *Climate Policy* 23 (3): 379–94. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2179589>.
- Oschlies, Andreas, Lennart T. Bach, Rosalind E. M. Rickaby, Terre Satterfield, Romany Webb, and Jean-Pierre Gattuso. 2023. "Climate Targets, Carbon Dioxide Removal, and the Potential Role of Ocean Alkalinity Enhancement." *State of the Planet 2-oe2023* (November): 1–9. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-1-2023>.
- Otto, Danny, Maria Pfeiffer, Mariana Madruga de Brito, and Matthias Gross. 2022. "Fixed Amidst Change: 20 Years of Media Coverage on Carbon Capture and Storage in Germany." *Sustainability: Science Practice and Policy* 14 (12): 7342. <https://doi.org/10.3390/su14127342>.

- Palmgren, Claire R., M. Granger Morgan, Wändi Bruine de Bruin, and David W. Keith. 2004. "Initial Public Perceptions of Deep Geological and Oceanic Disposal of Carbon Dioxide." *Environmental Science & Technology* 38 (24): 6441–50. <https://doi.org/10.1021/es040400c>.
- Patterson, James J., Thomas Thaler, Matthew Hoffmann, Sara Hughes, Angela Oels, Eric Chu, Aysem Mert, Dave Huitema, Sarah Burch, and Andy Jordan. 2018. "Political Feasibility of 1.5°C Societal Transformations: The Role of Social Justice." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 31 (April): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.11.002>.
- Renforth, Phil, and Gideon Henderson. 2017. "Assessing Ocean Alkalinity for Carbon Sequestration." AGU Publications. <https://doi.org/10.1002/2016RG000533>.
- Rickels, Wilfried, Christine Merk, Fabian Reith, David P. Keller, and Andreas Oschlies. 2019. "(Mis)conceptions about Modeling of Negative Emissions Technologies." *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]* 14 (10): 104004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3ab4>.
- Riebesell, Ulf, Daniela Basso, Sonja Geilert, Andrew W. Dale, and Matthias Kreuzburg. 2023. "Mesocosm Experiments in Ocean Alkalinity Enhancement Research." *Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research*. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-6-2023>.
- Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, et al. 2018. "Chapter 2: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development." In *Global Warming of 1.5 °C an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://pure.iiasa.ac.at/15515>.
- Romanak, Katherine, Mathias Fridahl, and Tim Dixon. 2021. "Attitudes on Carbon Capture and Storage (CCS) as a Mitigation Technology within the UNFCCC." *Energies* 14 (3): 629. <https://doi.org/10.3390/en14030629>.
- Satterfield et al. 2023. "Social Considerations and Best Practices to Apply to Engaging Publics on Ocean Alkalinity Enhancement." *State of the Planet 2-oe2023* (November): 1–22. <https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-11-2023>.
- Schenuit, Felix, Rebecca Colvin, Mathias Fridahl, Barry McMullin, Andy Reisinger, Daniel L. Sanchez, Stephen M. Smith, Asbjørn Torvanger, Anita Wreford, and Oliver Geden. 2021. "Carbon Dioxide Removal Policy in the Making: Assessing Developments in 9 OECD Cases." *Frontiers in Climate* 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.638805>.
- Schiermeier, Quirin. 2009. "Ocean Fertilization Experiment Suspended." *Nature Publishing Group UK*. January 14, 2009. <https://doi.org/10.1038/news.2009.26>.
- Smith, Pete, Steven J. Davis, Felix Creutzig, Sabine Fuss, Jan Minx, Benoit Gabrielle, Etsushi Kato, et al. 2015. "Biophysical and Economic Limits to Negative CO₂ Emissions." *Nature Climate Change* 6 (1): 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>.
- Snæbjörnsdóttir, Sandra Ó., Eric H. Oelkers, Kiflom Mesfin, Edda Sif Aradóttir, Knud Dideriksen, Ingvi Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Juerg M. Matter, Martin Stute, and Sigurdur R. Gislason. 2017. "The Chemistry and Saturation States of Subsurface Fluids during the in Situ Mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix Site in SW-Iceland." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 58 (March): 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.01.007>.
- Snæbjörnsdóttir, Sandra Ó., Bergur Sigfússon, Chiara Marieni, David Goldberg, Sigurður R. Gislason, and Eric H. Oelkers. 2020. "Carbon Dioxide Storage through Mineral Carbonation." *Nature Reviews Earth & Environment* 1 (2): 90–102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>.
- Stone, Kathy, Mahadev Bhat, Ramachandra Bhatta, and Andrew Mathews. 2008. "Factors Influencing Community Participation in Mangroves Restoration: A Contingent Valuation Analysis." *Ocean & Coastal Management* 51 (6): 476–84. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2008.02.001>.
- Suitner, Niels, Giulia Faucher, Carl Lim, Julieta Schneider, Charly A. Moras, Ulf Riebesell, and Jens Hartmann. 2023. "Ocean Alkalinity Enhancement Approaches and the Predictability of Runaway Precipitation Processes – Results of an Experimental Study to Determine Critical Alkalinity Ranges for Safe and Sustainable Application Scenarios." *EGU Sphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2611>.
- SWP-Berlin, Carbon Management Chancen und Risiken für Ambitionierte Klimapolitik. n.d. "»Carbon Management«: Chancen und Risiken für ambitionierte Klimapolitik." Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Accessed May 27, 2024. <https://www.swp-berlin.org/publikation/carbon-management-chancen-und-risiken-fuer-ambitionierte-klimapolitik>.
- SWP-Berlin, CO₂ Entnahme als Integraler Baustein des Europäischen Green Deal, 2024. n.d. "CO₂-Entnahme als integraler Baustein des Europäischen »Green Deal«." Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Accessed May 27, 2024. <https://www.swp-berlin.org/publikation/co2-entnahme-als-integraler-baustein-des-europaeischen-green-deal>.
- SWP-Berlin, Die Nächste Phase Europäischer Klimapolitik, 2024. n.d. "Die nächste Phase europäischer Klimapolitik: das 2040-Ziel als Auftakt." Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Accessed May 27, 2024. <https://www.swp-berlin.org/publikation/die-naechste-phase-europaeischer-klimapolitik-das-2040-ziel-als-auftakt>.
- Terrile, Richard J., Fred G. Doumani, Gary Y. Ho, and Byron L. Jackson. 2015. "Calibrating the Technology Readiness Level (TRL) Scale Using NASA Mission Data." In *2015 IEEE Aerospace Conference*, 1–9. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119313>.

- Vande Velde, Katherine, Jean Hugé, Daniel A. Friess, Nico Koedam, and Farid Dahdouh-Guebas. 2019. "Stakeholder Discourses on Urban Mangrove Conservation and Management." *Ocean & Coastal Management* 178 (August): 104810. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.012>.
- Vangkilde-Pedersen, Thomas, Karen Lyng Anthonsen, Nikki Smith, Karen Kirk, Filip Neele, Bert van der Meer, Yann Le Gallo, et al. 2009. "Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide—the EU GeoCapacity Project." *Energy Procedia* 1 (1): 2663–70. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.034>.
- West, R. J. 2010. "Rehabilitation of Seagrass and Mangrove Sites – Successes and Failures in NSW." *Wetlands Australia Journal* 14 (January): 13–19. <https://doi.org/10.31646/WA.173>.
- Whitmarsh, Lorraine, Dimitrios Xenias, and Christopher R. Jones. 2019. "Framing Effects on Public Support for Carbon Capture and Storage." *Palgrave Communications* 5 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0217-x>.
- Willscher, B. n.d. "Die CO₂-Speicherkapazität in Salinen Aquiferen in Der Deutschen Nordsee." Bundesanstalt Für Geowissenschaften Und Rohstoffe.
- Yao, Wanxuan, Teresa Morganti, Jiajun Wu, Malgorzata Borchers, Anna-Adriana Anschutz, Lena-Katharina Bednarz, Amrita Bhaumik, et al. 2024. "Exploring Site-Specific Carbon Dioxide Removal Options with Storage or Sequestration in the Marine Environment – The 10 Mt CO₂ Yr⁻¹ Removal Challenge for Germany." ESS Open Archive. <https://doi.org/10.22541/essoar.171650351.11778445/v1>.
- Zhao, Xin, Bryan K. Mignone, Marshall A. Wise, and Haewon C. McJeon. 2024. "Trade-Offs in Land-Based Carbon Removal Measures under 1.5 °C and 2 °C Futures." *Nature Communications* 15 (1): 2297. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46575-3>.

13. Anhang: Indikatoren und Kriterien (englisch)

I01	Impacts on air quality	Will there be changes in air quality? (i.e. regional concentration threshold of ground level ozone levels, particle pollution, sulfur dioxide and nitrogen dioxide)
I02	Impacts on surface water quality	Will there be changes in seawater (surface water) quality? (i.e. Changes in nutrients, oxygen, heavy metal concentration and sedimentation in the seawater due to mCDR measure)
I03	Impacts on marine water quality	Will there be changes in seawater (marine water) quality? (i.e. Changes in nutrients, oxygen, heavy metal concentration and sedimentation in the seawater due to mCDR measure)
I04	Impacts on ground water quality	Will there be changes in sea water (ground water) quality? (i.e. Changes in nutrients, oxygen, heavy metal concentration and sedimentation in the seawater due to mCDR measure)
I05	Impacts on the chemical and physical quality of soils (marine sediments and land)	Are there changes in nutrient (e.g., N, P), oxygen, heavy metal concentration, and sedimentation in the runoff water, water body, soil or sediments due to CDR measure?
I06	Impacts on net effects of audible noise on humans and ecosystems	Are there any impacts on humans and non-humans from audible noise caused by the mCDR measure? (Env Ethics)
I07	Impacts on local ocean circulation	Does the deployment of mCDR X method affect local ocean circulation?
I08	Impacts on local and global biodiversity	Will the option affect local or global biodiversity? (Leg)
I09	Impact on ecosystem primary production	Does the option impact local primary production/ecosystem productivity?
I10	Impact on food web dynamic	Does the option impact maintenance of food web dynamics?
I11	Impact on habitat provision species	Are there impactings on habitat provisioning species (e.g., biogenic habitats, such as marine or terrestrial plants, and sponges, corals which provide habitat for species)?
I12	Impact on habitat for breeding	Does the option impact breeding for species in the ecosystem?
I13	Impact on habitat integrity	Does the option impact the integrity of the habitat?
I14	Impacts on risk of invasive species	Does the option increase the risk of invasive species?
I15	Impacts on ecosystem resilience	If the ecosystem is negatively affected by the option, will the ecosystem be able to adapt (ecosystem resilience)?
I16	Impacts on ecosystem functioning	Concluding the questions on ecosystem primary production, food web dynamics, habitat provision species, habitat for breeding, habitat integrity, risk of invasive species, ecosystem resilience: Are there impacts on the ecosystem functioning?
I17	Reversibility of the impact	To what degree will the aggregated set of anticipated or unanticipated impacts be mitigated/reversed after the end of the mCDR activity?
I18	Impacts on local freshwater availability	Does the deployment of mCDR X method alter the local freshwater availability (e.g., changes in groundwater/aquifer levels due to CDR measure)?

I19	Animal fatalities	Will the option cause the death of animals and, if so, of which animals and how many of them?
I20	Impacts on local climate	Are there effects on local climate that are related to biophysical effect/s (e.g. radiative forcing)?
I21	CO ₂ sequestration and storage	How much CO ₂ per year can this mCDR pilot test remove from the atmosphere and store/sequester durably? (Econ)
I22	Changes in rate of CO ₂ removal over the year (Δ CO ₂ /y)	Is the rate of (permanent) CO ₂ removal (and storage) from the atmosphere stable or changing over time (increases / decreases over time), within the time period of the project and after? (Econ)
I23	Lead-up time for full potential of removal rate	How long does it take to reach the full potential effectiveness (max removal rate)? (Econ)
I24	Removal potential of other GHGs	Does the mCDR method remove other (non-CO ₂) GHGs from the atmosphere? (Econ)
I25	Life-cycle emission of GHGs	What are the life cycle emissions of the pilot study? (Econ)
I26	Natural persistence of storage	At the current climate state, on what time scale does the carbon (sequestration) reservoir work/ For how long can CO ₂ be actively removed? (Econ)
I27	Risk of losing carbon due to natural perturbation	How high is the risk of storage leakage (or re-release of CO ₂) due to natural perturbation (i.e. storms)? (Econ)
I28	Risk of losing carbon due to man-made perturbations	How high is the risk of losing stored carbon due to man-made perturbations (including anthropogenic climate change)? (Econ)
I29	Emissions persist after the termination	What is the risk of any remaining emissions taking place should we decide to stop X? (Leg, Econ)
I30	Changes of CO ₂ fluxes	Does the mCDR activity cause indirect/undirected changes of seasonal CO ₂ fluxes (either uptake or emission) compared to the baseline?
I31	Changes of GHG fluxes	What are the (indirect) changes of GHG fluxes (either uptake or emission) compared to the baseline?
I32	Changes in albedo	Is regional albedo affected?
I33	Climate consequence of stopping the CDR	Is there a risk of an increasing speed of warming in the case of termination? (Leg, Econ)
I34	Geophysical and chemical local conditions suitability	Are the geophysical and chemical local conditions suitable?
I35	Habitat suitability for biological components	If applicable, is the habitat suitable for the bio-based components (e.g., kelp)?
I36	Geological resources availability from the land and sea.	If applicable, is suitable land and/or geological formations available for storage? (Econ)
I37	Current and potential future infrastructure capacity along the supply chain	Do necessary infrastructures already exist? If not, can we create those first? (e.g., energy grid, roads, pipelines) (Econ)

I38	Material resource availability	Is the material required for this mCDR activity available, possible to produce, or must be bought/taken from somewhere else? (Econ)
I39	Energy availability	Are there enough low-carbon energy sources for the mCDR option X? (Econ)
I40	Area demand on land and sea	What is the percentage of land/sea area in the region additionally used, and the increase in area demand per year?
I41	Work skills amount and competences	What kind of specialized skills do workers need for this work and are they available? (Econ)
I42	Possibility to recruit skilled workers	If no skilled workers are available locally, can they be sourced from elsewhere?
I43	Conflicts or competition with existing and alternative marine spatial planning and other uses	Are there conflicts with existing uses of the marine area such as shipping routes, fishing grounds? (Pol, Leg)
I44	Maturity of mCDR approach	How mature are the technologies necessary for mCDR option X? (Econ)
I45	Expected technological progress	Will technological advancements occur?
I46	Risk management capacity in the facility	Is there (technical) risk management capacity to deal with potential accidents? (Leg)
I47	Human fatalities & health impacts	Do we foresee health impacts on humans due to the option (positive or negative)? (Econ)
I48	Impact on employment	Will new jobs be created by the option? Are existing jobs threatened by it? (Econ)
I49	Impact on provisioning services	Will there be influence on ecosystem provisioning services (wild catch fishery, farmed fishery, biotic raw material)? (Env Ethics)
I50	Impact on cultural services	Will there be an effect on an ecosystem's ability to provide cultural services (Leisure, recreation and tourism, aesthetic experience, inspiration for culture, art and design, cultural heritage, cultural diversity)?
I51	Impact on regulating services	Will there be any influence on regulating services (air purification, climate regulation, disturbance prevention and moderation, regulation of water flows, waste treatment and assimilation, coastal erosion protection, biological control, migratory and nursery habitat, gene pool protection)?
I52	International distribution of impacts on people	Global Level (if applicable): Will there be burdens for people in the Global South? How severe will they be?
I53	National distribution of impacts on people	Global Level (if applicable): Will there be burdens for people in the Global South? How severe will they be?
I54	Other harms & benefits for humans	Will the activity have impacts (positive & negative) on humans not covered by the other indicators? (Econ)
I55	Marginal removal costs	Marginal Removal Cost: How much needs to be spent to remove one additional metric ton of CO ₂ ? As a proxy to derive the MRC serve the operational costs for running the mCDR measure.

I56	Opportunity cost	Opportunity Cost: Are there foregone alternative uses of the deployed production factors?
I57	Expected cost reductions	Can cost reductions be expected? – by Economies of Scale (decreasing average production costs per unit of cdr when cdr is scaled up), by learning-by-doing effects in the production process (that decrease average production costs per unit of cdr), or by economies of scope (marketable by-products)?
I58	Public transaction costs	Public transaction costs: Are there costs for implementation, MRV, and enforcement of regulations that accrue on the side of the public administration?
I59	Private transaction costs	Private transaction costs: What costs are there other than production costs for private actors (for complying with regulations, for using the market, for insuring against risks, for MRV...)? (Existence of accounting schemes and integration in the EU ETS influence these costs.)
I60	Capital intensity	Capital intensity: How much is the share of capital cost (expenditure to buy, maintain, or improve its fixed assets for applying the mCDR option) in total costs? (Pol)
I61	Investment specificity	Investment Specificity: Are there conceivable alternative applications of the investment or is the investment highly specific? (Pol)
I62	Revenue risk	Revenue Risk: How big is the risk that revenues fail to accrue once the investment is made? This is connected to the expectations on carbon prices.
I63	External effects	External Effects: How much monetized damages/benefits to third party actors caused by the mCDR activity are there? Do corresponding compensation schemes exist? (Jus, Leg)
I64	Public availability of information about previous experiences with similar options	Is relevant information about previous experiences with similar options made publicly accessible? (Pol)
I65	Public availability of information about decision making process	Is relevant information about decision making process made publicly accessible? (Pol)
I66	Involvement and influence of democratically-elected governance bodies in the decision making process	To what extent are democratically-elected governance bodies involved in the decision-making process about the mCDR activity? (Pol)
I67	Representation of (potential) climate victims in decision making process	Do people affected by the (positive and negative) effects have a say in the decision-making process? (Pol, Leg)
I68	Performance of EIA	Has an EIA been done and at what level of quality was it executed?
I69	Quantification of CO ₂ fluxes and uncertainty of measurement	Is the net amount of CO ₂ removed from the atmosphere monitored and what are the uncertainties of the measurement?
I70	Quantification of other GHG fluxes and uncertainty of measurement	Is the amount of other GHG fluxes monitored and what are the uncertainties of the measurement?
I71	Monitoring of environmental impacts and uncertainty of measurement	Are environmental impacts monitored and what are the uncertainties of the measurement? (Env Ethics, Pol, Jus)

I72	Administrative capacity/existence of (national) institutional arrangements to implement mCDR regulation	Is there (national) administrative/institutional capacity to transparently implement and verify the mCDR accounting scheme? (Econ)
I73	Quantification ability of life cycle emissions & its uncertainty.	Is it possible to to quantify the GHG emissions in the life cycle of deployment?
I74	Alternative options for reaching same results	Are there alternative options for reaching the same results?
I75	Restrictions on the substances used	Does the activity involve the use of dangerous/restricted/prohibited materials?
I76	Restrictions on the process used	Does the activity involve the use of dangerous/restricted/prohibited processes?
I77	Impact on cultural heritage	Will cultural heritage/natural monuments including those underwater be affected?
I78	Impact on indigenous rights	Is the activity area overlapping with indigenous property or rights?
I79	Respect of rights	Does the activity respect protected rights? (Pol, Jus)
I80	Existence of dedicated regulation	Is the activity directly regulated/prohibited at any applicable level of law?
I81	Existence of jurisprudence	Have there been any court cases about related issues in the past that might provide guidance on what is allowed/not allowed, even if there are not clear laws in place?
I82	Existence of contract for dispute settlement	Is there a contract for dispute settlement?
I83	Reference to mCDR by members of government/parliament etc.	Is there government supported research into mCDR?
I84	Inclusion of mCDR in EU/national government climate strategy documents/communications	Has mCDR begun to be mentioned in national/regional (EU) climate policy documents? (Econ)
I85	Level of heterogeneity/polarization between relevant political actors' (and relevant publics?) positions on/perceptions of mCDR	Is there an open political debate about mCDR in Germany? Do political parties (and their constituencies) in Germany support or oppose mCDR?
I86	Level of volatility of political actors positions on mCDR (waves of opening and closing of the debate and shifting position building)	Have political actors often changed their positions on mCDR? (Econ)
I87	Incorporation/codification of mCDR in national/EU climate law	Has mCDR been integrated into national/regional (EU) climate policy? (Econ)
I88	Inclusion of mCDR in regional and/or international climate/carbon accounting scheme	Is there a politically institutionalized regional/international (EU/IPCC) CDR certification/accounting scheme that covers mCDR? (Econ)
I89	Integration of mCDR in carbon market (EUETS)	Has mCDR been included in a carbon market (e.g. EU ETS)?

I90	Perception of mCDR in general public	How does the general public perceive the activity and is there the potential for political support or opposition?
I91	Perception of mCDR in directly affected public	How does the locally affected public perceive the activity and is there the potential for political support or opposition?