



Sachbericht zum Verwendungsnachweis TEIL I - Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Förderkennzeichen: 03F0898A

Vorhabenbezeichnung:

Unified ASsessment framework for proposed methods of MARine CDR and interim knowledge SYnthesis

Bewertungsrahmen für marine CO₂-Entnahme und Synthese des aktuellen Wissenstandes

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 – 31.07.2024

Autor:innen: Hendrikje Wehnert, Prof. Gregor Rehder

Date: 31.01.2025



1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde
2. Ablauf des Vorhabens
3. Wesentliche Ergebnisse (sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen)

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Verbund ASMASYS hatte die Aufgabe, einen transdisziplinären Bewertungsrahmen für marine CDR-Optionen (Carbon Dioxide Removal) zu entwickeln, um eine einheitliche Grundlage für deren Beurteilung zu schaffen. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf der interdisziplinären Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen der Naturwissenschaften, Rechts- und Sozialwissenschaften sowie Ethik und Politikwissenschaften sowie der transdisziplinären Einbeziehung von potentiellen zukünftigen Nutzer:innen des Bewertungsrahmens (Stakeholder aus Politik, Ministerien, Bundesämtern und Nicht-Regierungsorganisationen (NGOs)) liegen. Die Aufgaben des IOW (ASMASYS-A) lag in den folgenden Arbeitspaketen:

AP0 - Koordination und Management des ASMASYS-Verbundes

AP1 - Bewertung der Wirksamkeit, Umweltrisiken und Erfolgskontrolle mariner CDR-Optionen (Task 1.1 mit GEOMAR; Task 1.5, verantwortlich IOW, mit allen Partnern),

AP2 -Interdisziplinäres Review mariner CDR-Optionen für Deutschland (Task 2.1 und Task 2.2, verantwortlich GEOMAR, mit allen Partnern),

AP3 - Bewertung einzelner mariner CDR-Methoden und der Zusammenstellung der Interim-Synthese (Task 3.1 und Task 3.2, verantwortlich IOW, mit allen Partnern),

AP 4 - Transfer (4.1 - 4.3 Zuarbeit und teilweise inhaltliche Koordination, Produkterstellung am GEOMAR).

Fachlich brachte das IOW vor allem die naturwissenschaftliche Perspektive ein. Über einen Unterauftrag an ein Unternehmen konnte auch technische und ingenieureswissenschaftliche Expertise zu unterschiedlichen CDR-Methoden in die Projektarbeit eingebracht werden.

Zum Zeitpunkt der Beantragung des Projekts gab es bereits Ansätze für Bewertungstools für CDR-Optionen. Allerdings zeigten diese eine Fokussierung auf technische Machbarkeit. Der von der Helmholtz-Initiative entwickelte HICAM-Rahmen wurde zu Beginn der ASMASYS-Laufzeit veröffentlicht. Er zeigte bereits eine Öffnung zur Multidisziplinarität, wurde jedoch rein in der wissenschaftlichen Community entwickelt. ASMASYS wollte hier mit dem transdisziplinären Ansatz deutlich weitergehen, sowohl inhaltlich durch gleichberechtigtes Einbringen unterschiedlichster wissenschaftlicher Disziplinen, wie auch in Hinblick auf die Vorgehensweise durch ständige Interaktion der Vertreter:innen der unterschiedlichen Fachrichtungen sowie politischer und gesellschaftlicher Akteure.

2. Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens orientierte sich grundsätzlich am Arbeitsplan. Im Laufe der Arbeiten stellte sich heraus, dass sowohl der interdisziplinäre Austausch im ASMASYS-Team als auch die Umsetzung der Transdisziplinarität durch Einbeziehung von Stakeholdern aus Poli-

tik und Bundesministerien und -behörden und NGOs zeitaufwändiger waren, als in der Planung angenommen. Daher wurden mit 20 Think and Exchange Tank (-Treffen) deutlich mehr als die geplanten durchgeführt. In der Folge sind einige Publikationen später in die Veröffentlichung gegangen als geplant. Die Projektziele sind jedoch vollumfänglich erbracht worden.

3. Wesentliche Ergebnisse (sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen)

Die Wissenschaftler:innen des IOW arbeiteten über die gesamte Projektzeit eng mit den Partner:innen vom GEOMAR | Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Leibniz-Institut für Weltwirtschaft (IfW), Christian-Alberchts-Universität zu Kiel (CAU) und der Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP) zusammen. Darüber hinaus bestand ein institutionalisierter Austausch zu den anderen Verbänden der Forschungsmission CDRmare. Insbesondere zum transdisziplinären Bewertungsrahmen wurden auch Kolleg:innen aus CDRterra / CDRSyntra kontaktiert.

AP0 - Koordination und Management des ASMASYS-Verbundes

Das Projekt wurde durch eine strukturierte Koordination und Managementprozesse erfolgreich umgesetzt. Besondere Herausforderungen, wie personelle Wechsel und die Integration internationaler Partner, wurden erfolgreich bewältigt. Dazu gehörten unter anderem die Organisation der Jahrestreffen, Mitorganisation der General Assemblies der Mission CDRmare, Vorbereitung und Durchführung der monatlichen Jour-Fixes des gesamten ASMASYS-Teams und der Think and Exchange Tanks (TETs, siehe Abschnitt 0.2) (M 0.1.1). Aufgrund der internationalen Beschäftigten im Verbund wurde Englisch als Kommunikationssprache gewählt. Zudem wurde in der ersten Phase durch die projektangestellte Managerin Unterstützung der Co-Chairs und einiger Aufgaben der Gesamtmission geleistet.

AP1 - Bewertung der Wirksamkeit, Umweltrisiken und Erfolgskontrolle mariner CDR-Optionen (mit besonderem Fokus auf Modellierung, Monitoring und regulatorische Aspekte).

Es wurde eine umfangreiche Literaturdatenbank aufgebaut, die langfristig in den CDR-Atlas integriert werden soll. Zudem wurden Indikatoren und Messgrößen für die Bewertung von mCDRs entwickelt und in den transdisziplinären Bewertungsrahmen eingebettet.

Die Entwicklung des transdisziplinären Bewertungsrahmens für marine CDR-Methoden war Schwerpunkt in AP1. Die konzeptionelle Ausarbeitung begann 2022 und wurde in 20 TETs intensiv diskutiert. Dabei entstand eine Struktur mit einem Indikatorenpool und in Fragen formulierten Kriterien sowie sieben Dimensionen, die durch Bewertungsleitfragen charakterisiert sind. Diese Dimensionen bilden die Grundlage für zwei übergreifende Fragen: zur „Machbarkeit“ (Was können wir tun?) und zur „Erwünschtheit“ (Was sollten wir tun?). Ziel ist es, Nutzende bei der Entscheidung über umsetzbare und prioritäre mCDR-Optionen zu unterstützen, ohne präskriptiv zu sein.

AP2 - Interdisziplinärer Review mariner CDR-Optionen in Deutschland

Die Zusammenstellung wesentlicher Informationen zu CDR-Optionen erfolgte insbesondere in der Bearbeitung einer „10-Millionen-Tonnen-CO₂-Entnahme-Challenge“. Dabei wurde untersucht, welche Methoden realistisch umsetzbar sind, das Potential einer CO₂-Entnahme von 10 Millionen Tonnen pro Jahr haben, und welche infrastrukturellen, politischen und regulatorischen Hürden bestehen.

AP3 - Bewertung einzelner mariner CDR-Methoden und der Zusammenstellung der Interim-Synthese

Vier hypothetische Testfälle wurden für die Anwendung auf den interdisziplinären Bewertungsrahmen durch das ASMASYS-Team unter Mitwirkung des IOW entwickelt (Ozeanische Alkalinitätserhöhung, Erhöhte Akkumulation von blauem Kohlenstoff in maritimen Ökosystemen (Blue Carbon Ecosysteme Enhancement BCEe), Marine CO₂-Speicherung in der ozeanischen Kruste in der Tiefsee (mCS), marine CO₂-Speicherung in Sandsteinformationen in der Nordsee). Diese wurden in Think-and-Exchange-Tank (TETs) mit Stakeholdern evaluiert. Das IOW brachte jeweils die naturwissenschaftlich-technische Expertise ein und trug zur Entwicklung des Bewertungsrahmens bei. Weitere Einschätzungen zu klar definierten Szenarien wurden im Rahmen der Arbeiten zur "10-Millionen-Tonnen-CO₂-Entnahme-Challenge" durchgeführt.

Die Zwischen-Synthese wurde zum Ende der Laufzeit durch die Wissenschaftler:innen des IOW entworfen. Die anschließende Zusammenarbeit des ASMASYS-Teams am Produkt wurde durch das IOW koordiniert, wobei auch Anregungen durch Expert:innen und Stakeholder berücksichtigt wurden..

AP4: Wissenstransfer

Der Wissenstransfer der Forschungsmission wurde durch das Einbringen der Expertise des IOW-Wissenschaftler:innen, insbesondere durch den Verbundleiter, in Workshops, Vorträge und politische Beratung eingebracht. Auch vielzählige Veröffentlichungen wie CDRmare Factsheets, Insights und nicht zuletzt die Zwischen-Synthese zum Bewertungsrahmen tragen zum Transfer der Ergebnisse in Politik, Verwaltung und Gesellschaft bei. Es gelang auch schon während der Projektlaufzeit, Erkenntnisse in Entscheidungsprozesse einzubringen. Zu nennen sei hier insbesondere der Entwurf der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

Liste der peer-reviewed Publikationen sowie eine Auswahl der transfer-orientierten Publikationen unter Beteiligung der Wissenschaftler:innen des IOW:

Baatz, C.; Tank, L.; Bednarz, L.; Boettcher, M.; **Morganti, T.**; Voget-Kleschin, L.; Cabus, T.; Doorn, E. van; **Holzhueter, W.**; Keller, D.; **Kreuzburg, M.**; Matz-Lück, N.; Mengis, N.; Merk, C.; Oschlies, A.; **Wehnert, H.**; Yao, W.; **Rehder, G.** (under review in Environmental Research Letters): A Holistic Assessment Framework for Marine Carbon Dioxide Removal Options.

Tank, L.; Voget-Kleschin, L.; Garschagen, M.; Boettcher, M.; Mengis, N.; **Rehder, G.**; Baatz, C. (under review in npj climate action): Distinguish between Feasibility and Desirability when Assessing Climate Response Options.

Morganti, T., Mengis, N., Oschlies, A. et al. (submitted to Environmental Research Letters): Monitoring marine carbon dioxide removal: quantitative analysis of indicators for carbon removed and environmental side-effects.

Yao, W., **Morganti, T.**, Wu, J. et al. (under review in Earth's Future): 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.

2025

Löschke, S., **Kreuzburg, M.**, **Rehder, G.**, Boettcher, M., Tank, L. und Baatz, C. and **ASMASYS-Konsortium** (2025) CDRmare Insights: New guidelines on the uniform and knowledge-based assessment of marine CO₂ removal methods. GEOMAR, Kiel, Germany. DOI: 10.3289/CDRmare.45.

Löschke, S., **Kreuzburg, M., Rehder, G.**, Boettcher, M., Tank, Lukas und Baatz, C. and **AS-MASYS-Konsortium** (2024) CDRmare Insights: Neuer Leitfaden: Marine CO₂-Entnahmemethoden und -projekte einheitlich und wissenschaftsbasiert bewerten. GEOMAR, Kiel, Germany, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.40.

Morganti, T., Mengis, N., Oschlies, A. et al. Monitoring marine carbon dioxide removal: quantitative analysis of indicators for carbon removed and environmental side-effects. Pre-Print, ESS Open Archive. DOI: 10.22541/essoar.173712519.98707691/v1

2024

Amann, T., Baatz, C., Böttcher, M., Geden, O., Keller, D. P., Kopf, A., Merk, C., Milinski, S., Mintenbeck, K., Oschlies, A., Pongratz, J., Proelß, A., **Rehder, G.**, Rickels, W., Riebesell, U., Sswat, M., Tank, L., Wallmann, K., Westmark, L., Wölfelschneider, M. und Zimmer, M. (2024) World Ocean Review: The Ocean – A Climate Champion? How to Boost Marine Carbon Dioxide Uptake. Open Access. World Ocean Review, 8. Maribus, Hamburg, Germany, 243 pp. ISBN 978-3-86648-733-8

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.37

Kreuzburg, M., Baatz, C., Bednarz, L., Böttcher, M., Merk, C., **Morganti, T.**, Tank, L., Yao, W., **Wehnert, H., Rehder, G.**, (2024). Bewertungsrahmen für marine CO₂-Entnahme und Synthese des aktuellen Wissenstandes, ASMASYS, Rostock, Germany. DOI 10.3289/CDRmare.38

Oschlies, A., N. Mengis, **Rehder, G.**, E. Schill, H. Thomas, K. Wallmann und M. Zimmer (2024). Mögliche Beiträge geologischer und mariner Kohlenstoffspeicher zur Dekarbonisierung. In: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Ed. by G. P. Brasseur, D. Jacob and S. Schuck-Zöller. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 449-458, doi: 10.1007/978-3-662-66696-8_35

Yao, W., **Morganti, T.**, Wu, J. et al. 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. preprint, *ESS Open Archive*. DOI: 10.22541/essoar.171650351.11778445/v1

Löschke, S. und Kopf, A. and AIMS3-Konsortium (2024) Neues Wissen zur CO₂-Speicherung in ozeanischer Kruste: Die sechs wichtigsten Erkenntnisse aus der AIMS3-Forschung. GEOMAR, Kiel, Germany, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.39.

2023

Amann, T., Baatz, C., Böttcher, M., Geden, O., Keller, D. P., Kopf, A., Merk, C., Milinski, S., Mintenbeck, K., Oschlies, A., Pongratz, J., Proelß, A., **Rehder, G.**, Rickels, W., Riebesell, U., Sswat, M., Tank, L., Wallmann, K., Westmark, L.,...Zimmer, M. (2023). World Ocean Review: Klimarettter Ozean? Wie das Meer (noch) mehr Kohlendioxid aufnehmen soll. Maribus. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/59429/>



Sachbericht zum Verwendungsnachweis

TEIL II – Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Förderkennzeichen: 03F0898A

Vorhabenbezeichnung:

Unified ASsessment framework for proposed methods of MARine CDR and interim knowledge SYnthesis

Bewertungsrahmen für marine CO₂-Entnahme und Synthese des aktuellen Wissenstandes

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 – 31.07.2024

Autor:innen: Hendrikje Wehnert, Prof. Gregor Rehder

Date: 31.01.2025



Inhalt

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	2
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	12
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	12
4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	13
5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	13
6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF	13

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der Verbund ASMASYS verfolgte die Entwicklung eines transdisziplinären Bewertungsrahmens für marine CDR-Optionen (Carbon Dioxide Removal), um eine einheitliche Grundlage für deren Beurteilung zu schaffen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der interdisziplinären Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen der Naturwissenschaften, Rechts- und Sozialwissenschaften sowie Ethik und Politikwissenschaften sowie die Einbeziehung von potentiellen zukünftigen Nutzer:innen des Bewertungsrahmens (Stakeholder aus Politik, Ministerien, Bundesämtern und Nicht-Regierungsorganisationen (NGOs)). Das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) zeichnete im Rahmen von ASMASYS A verantwortlich für Koordination und Management des ASMASYS-Verbundes (AP0). Wissenschaftlich brachte sich das IOW in folgenden Arbeitspaketen ein:

AP1 - Bewertung der Wirksamkeit, Umweltrisiken und Erfolgskontrolle mariner CDR-Optionen (Task 1.1 mit GEOMAR; Task 1.5, verantwortlich IOW, mit allen Partnern),

AP2 -Interdisziplinäres Review mariner CDR-Optionen für Deutschland (Task 2.1 und Task 2.2, verantwortlich GEOMAR, mit allen Partnern),

AP3 - Bewertung einzelner mariner CDR-Methoden und der Zusammenstellung der Interim-Synthese (Task 3.1 und Task 3.2, verantwortlich IOW, mit allen Partnern),

AP 4 - Transfer (4.1 - 4.3 Zuarbeit für GEOMAR, inhaltlich Endabnahme aller Outreach-Produkte).

AP0 - Koordination und Management des ASMASYS-Verbundes

Task 0.1 Management und Koordination

Der ASMASYS-Verbundleiter Prof. Dr. Gregor Rehder (IOW) ist zeitgleich Co-Chair der Forschungsmission CDRmare gewesen. Das IOW übernahm das zentrale Management des ASMASYS-Verbundes durch die Managerin in Abstimmung mit dem Verbundleiter. Dazu gehörten unter anderem die Organisation der Jahrestreffen, Mitorganisation der General Assemblies der Mission CDRmare, Vorbereitung und Durchführung der monatlichen Jour-Fixes des gesamten ASMASYS-Teams und der Think and Exchange Tanks (TETs, siehe Abschnitt 0.2) (M 0.1.1). Aufgrund der internationalen Beschäftigten im Verbund wurde Englisch als Kommunikationssprache gewählt. Zudem wurde in der ersten Phase durch die projektangestellte Managerin Unterstützung der Co-Chairs und einiger Aufgaben der Gesamtmission geleistet.

Im Berichtszeitraum wurden personelle Wechsel im Projektmanagement erfolgreich bewältigt. Bis Mitte 2023 war die Stelle der Projektmanagerin mit einer Vollzeitstelle besetzt, anschließend mit einer Teilzeitstelle weitergeführt, bevor im Dezember 2023 eine zusätzliche wissenschaftliche Vollzeitkraft für das Management gewonnen werden konnte. Diese Änderungen beeinflussten nicht die Erreichung der Projektziele. Die personelle Verstärkung in der letzten Projektphase erwies sich in Hinblick auf die Koordination der Arbeiten und Erstellung der Zwischen-Synthese (AP3) sogar als Glücksfall. Von Projektbeginn bis zum Ausscheiden im Mai 2023 unterstützte die Verbundmanagerin zudem die Sprecher der Forschungsmission, nahm aktiv an den Treffen des Executive Boards teil, und half bei koordinativen Aufgaben des Sprecherteams.

Der Kooperationsvertrag war Ende November 2021 von allen beteiligten Partnern unterzeichnet (M 0.1.2). Die ASMASYS-Managerin lieferte umfangreiche Texte und Informationen für die Erstellung der Website <https://asmasys.cdrmare.de>, die seit Herbst 2021 verfügbar ist. Die jährlichen Verbundtreffen und Beiträge von ASMASYS zu den Missions-Jahrestreffen wurden durch die Koordinatoren am IOW vorbereitet und organisiert. Des Weiteren wird das IOW den Abschlussbericht für den ASMASYS-Verbund erstellen (M 0.1.3).

Kick-off ASMASYS	29./30.09.2021	Travemünde
Jahrestreffen 2022	05./06.10.2022	Travemünde
Jahrestreffen 2023	26./27.09.2023	Warnemünde

Tab.1: Übersicht Jahrestreffen des Verbundprojekts ASMASYS

CDRmare Kick-off 2022	09./10.03.2022	Lüneburg
General Assembly 2023	30./31.01.2023	Stralsund
General Assembly 2024 mit CDRterra	12.-15.03.2024	Hannover

Tab. 2: Übersicht über die General Assemblies der Forschungsmission CDRmare

Task 0.2. Koordination, Dokumentation und Kommunikation der wissenschaftlichen Aktivitäten im Rahmen der Think and Exchange Tanks (TETs)

Der Begriff Think and Exchange Tanks wird für Treffen zur Entwicklung des interdisziplinären Bewertungsrahmes und der Zwischen-Synthese verwendet. Die TETs wurden als ein zentrales Element zur Förderung des inter- und transdisziplinären Austauschs innerhalb von ASMASYS sowie mit anderen Verbänden der Forschungsmission CDRmare und Einbeziehung von Stakeholdern und Expert:innen aus Politik, Ministerien und NGOs eingerichtet. Sie dienen der Diskussion wissenschaftlicher, technischer und gesellschaftlicher Fragen zu marinen CDR-Methoden. Die Kommunikation und der Austausch zu den wichtigsten gemeinsamen "Produkten" des Verbundes, nämlich die Entwicklung des holistischen Bewertungsrahmens für mCDR Methoden (Task 1.5) sowie die Zwischen-Synthese, einschließlich der Interaktion hierzu mit den relevanten Akteuren, erfolgte in diesem Format.

Im Projektverlauf fanden 20 TETs statt, sowohl online als auch in Präsenz. Im Jahr 2022 lag der Fokus auf der Entwicklung einer gemeinsamen Sprache innerhalb des Konsortiums, der Strukturierung des Bewertungsrahmens und der Erarbeitung von Kriterien. 2023 wurde der Bewertungsrahmen weiterentwickelt, indem er mit hypothetischen Testfällen für unterschied-

liche CDR-Methoden getestet wurde. Hierzu wurden teilweise Kolleg:innen aus anderen Verbänden bzw. von CDRterra (hier insbesondere CDRSyntra) sowie die externen Expert:innen aus Bundesbehörden und NGOs eingebunden. Letztere zum einen, um auf die Entwicklung des Bewertungsrahmens hinzuweisen und zum anderen, um die Bedarfe der potentiellen Anwender:innen von Beginn an in einem transdisziplinären Ansatz zu berücksichtigen.

TET	Titel	Datum
1	Diskussion des HICAM-Bewertungsmatrix	29.11.2022
2	Gemeinsames Verständnis und Formulierungen / Wording	31.01.2022
3	Wünschbarkeit und Machbarkeit (Feasibility and Desirability)	16.03.2022
4	Wie sammelt man Kriterien? Mit Kolleg:innen von CDRSyntra	22.04.2022
5	Sammeln von Kriterien	04./05.07.2022
6	Organisation und Gruppierung der Kriterien	30.08.2022
7	Entwicklung der Visualisierung des Bewertungsrahmens	06.10.2022
8	Politische Machbarkeit	03.11.2022
9	Erstellung von Kriterien und Indikatoren mithilfe von zwei Fallstudien	16./11.2022
10	Auswertung der Rückmeldungen aus Wissenschaft und von Stakeholdern zum Bewertungsrahmen von der Generalversammlung 2023	03.02.2023
11	Schlüsselfragen zu Kriterien	23.03.2023
12	Wie verbindet man Indikatoren?	18.04.2023
13	Querschnittsindikatoren	06.06.2023
14	Einbindung externer Expert:innen aus Behörden und NGOs mit Anwendung hypothetischer Testfall „Umsetzung der Anreicherung der Alkalinität der Ozeane in Deutschland“	04./05.07.2023
15	Navigieren im Meer der Indikatoren mit CDRterra-Vertreter:innen	28.08.2024
16	Einbindung externer Expert:innen aus Behörden und NGOs Anwendung hypothetischer Testfall „Test Case Blue Carbon Enhancement“	25./26.09.2023
17	Anwendung hypothetischer Testfall „Marine carbon dioxide storage in deep-sea basaltic rock off Norway (pilot study)“ mit Konsortium AIMS ³	06./07.02.2024
18	Gemeinsame Arbeit am Synthesebericht	12.03.2024
19	Anwendungsfall „Marine CO ₂ Speicherung im Sandstein der Nordsee“ mit Konsortium GEOSTOR	24.05.2024
20	Treffen zur Zusammenfassung der Ergebnisse	27./28.06.2024

Tab. 3: Übersicht der in der Projektlaufzeit durchgeführten Think and Exchange Tanks

AP1 - Bewertung der Wirksamkeit, Umweltrisiken und Erfolgskontrolle mariner CDR-Optionen

Task 1.1 - Evaluierung von Effizienz, Umweltrisiken und Überwachbarkeit

Seit Beginn des Projekts wurde umfassend Literatur zu marinen CDR-Methoden zusammengestellt. Diese diente als zentrale Wissensbasis für die verschiedenen Arbeitspakete und umfasst wissenschaftliche Beiträge zu unterschiedlichen CDR-Optionen mit besonderem Fokus auf Modellierung, Monitoring sowie regulatorische Aspekte. Um die Zusammenstellung der Literatur auch außerhalb des Verbundes nutzbar zu machen, wurde die Entscheidung gefällt, eine Literaturdatenbank aufzubauen und damit die ursprünglich projektierten Arbeiten zu erweitern. Hierzu wurde über das Projekt für drei Monate ein Programmierer eingestellt. Die Arbeit an der Datenbank und ihre Weiterführung über die Projektlaufzeit wurden anschließend durch eine studentische Hilfskraft unterstützt. In die Datenbank konnten umfangreiche Datensätze einer Literaturübersicht eines Experten der Northwestern University, USA integriert werden. Die Datenbank wurde bis einige Monate nach Projektende vom IOW gehostet. Im Sinne einer nachhaltigen Auffind- und Nutzbarkeit der Literaturdatenbank, auch über die Projektlaufzeit hinaus, wurden Vorbereitungen für die Integration in den [CDR-Atlas](#) getroffen. Die Anbindung ist für das Jahr 2025 vorgesehen. Derzeit kann die Literaturdatenbank über diesen [Link](#) erreicht werden (M 1.1.1).

Parallel zur Literaturrecherche wurden zentrale Indikatoren und Messgrößen identifiziert, die für die Bewertung mariner CDR-Methoden von Bedeutung sind. Diese Indikatoren decken verschiedene Dimensionen der Bewertung ab, darunter die technische Machbarkeit, ökologische Auswirkungen, soziale Akzeptanz und wirtschaftliche Tragfähigkeit. Das IOW, zusammen mit dem GEOMAR, hat die Indikatoren für die technisch-ökologische Dimension entwickelt, sowie eine Vielzahl anderer Indikatoren für Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit, Risiken und Zusatznutzen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund (M1.1.2) Im Rahmen der Think and Exchange Tanks (TETs) wurden erste Strukturierungsansätze dieser Indikatoren diskutiert, um sie in den transdisziplinären Bewertungsrahmen zu integrieren. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Indikatoren nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch in realen Anwendungsfällen praxisnah nutzbar sind. Die Indikatorenliste ist Teil der Zwischen-Synthese ([Kreuzburg et al. 2024](#); auch in Englisch verfügbar) und von zentraler Bedeutung auch für das übergeordnete Paper zum Bewertungsrahmen (Baatz et al., in Begutachtung; siehe auch Task 1.5) .

Im Rahmen der Literaturrecherche und -analyse zu den Meilensteinen M 1.1.1 und M 1.1.2 konnten zentrale Wissenslücken sowie Anforderungen an die Modellierung und Beobachtungsfähigkeiten identifizieren werden. Zur umfassenden Bewertung der Risiken und Co-Benefits meeresbasierter CDR-Methoden (mCDRs) haben GEOMAR und IOW relevante Kriterien und Indikatoren, die idealerweise quantifizierbar sind, in den ASMASYS-Bewertungsrahmen integriert. Die Modellierung von mCDRs verfolgt dabei mehrere zentrale Ziele. Einerseits sollen die Auswirkungen eines mCDR-Projekts auf die Kohlenstoffkreisläufe an Land und im Ozean erfasst werden, um eine verlässliche Grundlage für die Kohlenstoffbilanzierung zu schaffen. Andererseits ist die Entwicklung von Leitlinien zur Überwachung der Kohlenstoffspeichersicherheit essenziell, um die langfristige Stabilität und Effizienz der Maßnahmen zu gewährleisten. Gleichzeitig ist es notwendig, potenzielle ökologische Auswirkungen zu quantifizieren und die Folgen für marine Ökosysteme detailliert zu bewerten. Alle diese Perspektiven wurden systematisch erarbeitet und den relevanten Dimensionen des Bewertungsrahmens zugeordnet, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Bewertung mariner CDR-Methoden bereitzustellen.

Es erwies sich als sinnvoll, die Identifizierung des Wissens, das benötigt wird, um Modellierung und Messung zu kombinieren, um Risiken und Co-Benefits zu bewerten, in zwei Arbeitsbereiche zu teilen. Der eine Teil ist die Analyse der Modellierungslücken unter Leitung

des GEOMAR (Dokumentation hierzu im Bericht des Projektpartners GEOMAR, der andere Teil wurde vom IOW geleitet und konzentriert sich auf die Monitoringansätze und Überwachungslücken auf Basis von Messungen. Hierzu wurde das Forschungsfeld auf die Methoden der Alkalinitätserhöhung, des künstlichen Auftriebs und des Blue Carbon Enhancements eingegrenzt und mit dem Wissensstand systematisch untersucht. Wir folgten hierbei dem Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyseprotokoll PRISMA: Die Suchanfragen wurden festgelegt, und die Literatursuche und Kriterien für den Ein- und Ausschluss wurden transparent definiert. Die Literatursuche führte zu insgesamt 1257 bibliografischen Einträgen, von denen nur 149 die Einschlusskriterien erfüllten und umfassend geprüft wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass es oft schwierig ist, einen direkten Zusammenhang zwischen den Raten chemischer und biologischer Veränderungen und der Menge des entnommenen Kohlenstoffs sowie dem Ausmaß der damit verbundenen Umweltauswirkungen herzustellen. Die Heterogenität der marinen biogeochemischen und ökologischen Prozesse in Zeit und Raum sowie die Ausbreitung biogeochemischer Signale in einem offenen System sind die Herausforderungen, die am häufigsten in Bezug auf die Monitoring-Ansätze genannt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass dringend Indikatoren benötigt werden, die eine zuverlässige Quantifizierung der CO₂-Abbauraten und Informationen über die Umweltauswirkungen liefern. Auf Grundlage der Gap-Analyse wurde eine Reihe von Empfehlungen für die künftige Umweltüberwachung für marine CDR-Methoden abgeleitet. Diese Arbeiten wurden zu Beginn des Jahres 2025 bei Environmental Research Letters eingereicht. Das Manuskript befindet sich derzeit in der Begutachtung (Morganti et al., 2025). Ein Pre-Print ist online verfügbar ([LINK](#)). Das Manuskript dokumentiert die abgeschlossenen Arbeiten zu den Meilensteinen 1.1.3 und 1.1.4 in Bezug auf die Messungen.

Task 1.5 - Transdisziplinärer Bewertungsrahmen für Optionen der marinen Kohlenstoffspeicherung

Die Entwicklung des transdisziplinären Bewertungsrahmens für marine CDR-Methoden stellte den Schwerpunkt der Arbeiten in AP1 dar. Die konzeptionelle Ausarbeitung begann im Jahr 2022 und wurde im Rahmen der 20 TETs intensiv diskutiert. Im Laufe dieser Diskussionen wurde eine Struktur erarbeitet: Der Bewertungsrahmen besteht aus einem umfangreichen Satz von Kriterien und zugrundeliegendem Indikatorenpool und Dimensionen (veranschaulicht durch sieben Bewertungsleitfragen). 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 Nutzenden bei der Entscheidung zu unterstützen, welche mCDR-Optionen umsetzbar sind und welche Priorität haben sollten, ohne dabei präskriptiv zu sein. Die Arbeiten zum Bewertungsrahmen und damit zu AP1.5 gingen - nicht nur am IOW - weit über den erwarteten Arbeitsumfang hinaus. Grund hierfür war, auf Basis international geäußerter Kritik an bisherigen Bewertungsrahmen, i.e. des IPCC, eine strikte Trennung von Machbarkeit (Feasibility) und Erwünschtheit (Desirability) umzusetzen, um so die mögliche politische und gesellschaftliche Debatte und Meinungsbildung besser führen zu können. Zudem wurde das Konzept neu eingeführt, nach dem die herausgearbeiteten Indikatoren (siehe 1.1.2) mehrere Kriterien und Dimensionen „informieren“ können.

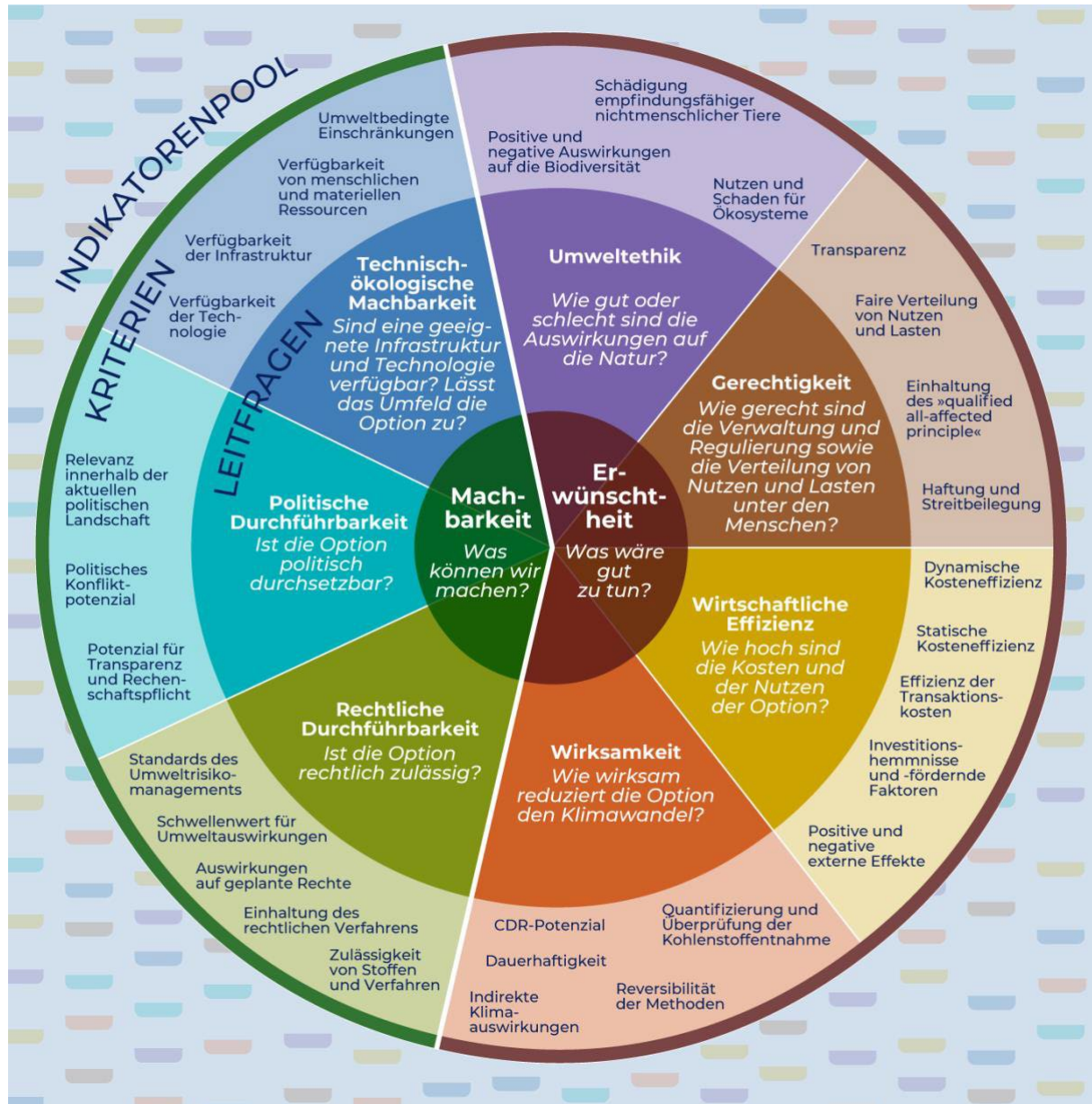


Abb. 1: Visualisierung der Struktur des transdisziplinären Bewertungsrahmens. Diese Darstellung, bei der durch die kreisförmige Anordnung und gleichverteilte Größe der Bereiche der einzelnen Dimensionen keinerlei Hierarchien ableitbar sind, erfolgte auf Anregung aus dem Kreis der Stakeholder. In der wissenschaftlichen Abhandlung (Baatz et al., eingereicht) ist eine andere Darstellung gewählt.

Das IOW brachte seine fachlichen Kompetenzen in die Ausgestaltung von Fragen/Kriterien und Indikatoren in der Dimension der technisch-ökologischen Machbarkeit ein sowie weitere auf naturwissenschaftlichen Gegebenheiten basierende Indikatoren. Für die Einschätzung der technischen Machbarkeit wurde durch das IOW im Rahmen von ASMASYS ein Unternehmen beauftragt, die ingenieur-technischen Expertise zu unterschiedlichen marine CDR-Optionen und deren technologischer Reife (technical readiness level - TRL) zusammenzustellen und in den Entwicklungsprozess einzubringen. Über die disziplinäre Arbeit hinaus, brachte sich das IOW in die strukturelle Entwicklung des Bewertungsrahmens ein und koordinierte den Austausch hierzu über die TETs. Die Indikatoren- und Kriterienliste und eine Kurzbeschreibung des "ASMASYS- Frameworks" und der Vorgehensweise zur Entwicklung ist Teil der Zwischen-Synthese (AP 3) (Kreuzburg et al., 2024). Eine ausführliche Darstellung ist in Baatz et al. (eingereicht) gegeben. Diese Publikation stellt wissenschaftlich das Hauptprodukt der gemeinsamen Arbeiten von ASMASYS dar (M1.5.1).

Zur Prüfung der Praktikabilität des Bewertungsrahmens wurden ab Mitte 2023 vier Szenarien (hypothetische Testfälle) entwickelt. In jeweils einem TET wurden die Szenarien auf den Bewertungsrahmen angewendet. Die Entwicklung der jeweils auf 10 - 15 Seiten beschriebenen Szenarien erforderte mehrere Treffen des Verbundes. Das IOW brachte auch hier in Zusammenarbeit mit dem GEOMAR seine naturwissenschaftlich-technische Expertise ein.

Hierbei wurde eine weitere Besonderheit des Bewertungsrahmens angewendet und verfeinert. Jeder Indikator ist mit einer Leitfrage verknüpft. Ein entsprechender Fragenkatalog (als Anforderungsdokument bzw. Unterstützungstool zur Bewertung von marinen CDR-Optionen) wurde ab März 2023 entwickelt und war für den 17. TET mit Stakeholdern Ende Juli 2023 einsatzbereit. Er wurde in mehreren TETs angepasst und verfeinert. Die Fragen sind in der Zwischen-Synthese im Anhang "Indikatoren und Kriterien" aufgeführt (Kreuzburg et al., 2024) und auch im Anhang von (Baatz et al., eingereicht) dokumentiert (M 1.5.2).

Die Anwendung der Tests ergab wertvolle Erkenntnisse, insbesondere in Bezug auf die Verknüpfung der Indikatoren innerhalb des Bewertungsrahmens. Zudem wurden die Rückmeldungen der Expert:innen und Stakeholder aus den TETs genutzt, um die Struktur und Methodik des Rahmens weiter zu optimieren.

Testfall 1:	Alkalinitätserhöhung im Ozean (Ocean Alkalinity Enhancement, OAE)
Testfall 2:	Erhöhte Akkumulation von blauem Kohlenstoff in maritimen Ökosystemen (Blue Carbon Ecosysteme Enhancement BCEe)
Testfall 3:	Marine CO ₂ - Speicherung in der ozeanischen Kruste in der Tiefsee (mCS)
Testfall 4:	mCS in Sandsteinformationen in der Nordsee

Tab. 4: Im Verbund entwickelte und behandelte hypothetische Testfälle (Szenarien)

Der Fortschritt in der Entwicklung des interdisziplinären Bewertungsrahmens wurde regelmäßig auf Veranstaltungen präsentiert, beispielsweise auf Generalversammlungen von CDRmare und vor dem Expert:innen-Forum. Die Wissenschaftler:innen des Verbundes beteiligten sich mit Vorträgen an wissenschaftlichen Fachveranstaltungen, wie beispielsweise dem Ocean Science Meeting 2024 in New Orleans oder der Negative CO₂-Emissions Conference 2024 in Oxford. Am Beispiel der Alkalinitätserhöhung durch Karbonateinbringung im Bereich der Ostsee wurde der Bewertungsrahmen auch auf der Baltic Sea Science Conference 2023 vorgestellt.

Neben der ausführlichen wissenschaftlichen Beschreibung (Baatz et al.) wurde die grundlegende Beschreibung der Vorteile und des Konzepts, Machbarkeit und Erwünschtheit in der Evaluierung von Klimawandel-Minderungsoptionen klar voneinander getrennt, in einem Manuskript beschrieben, das kurz vor der Veröffentlichung steht (Tank et al, submitted).

AP2 - Interdisziplinärer Review mariner CDR Optionen für Deutschland

Task 2.1 - Zusammenstellung der wesentlichen Informationen zu den in der Forschungsmission CDRmare untersuchten CDR-Optionen und

Task 2.2 - Review von CDR-Methoden außerhalb des derzeitigen Fokus der Forschungsmission CDRmare

Die ursprüngliche Vorstellung einfacher Reviews zu den bekannten CDR-Optionen wurden in Absprache mit dem Konsortium dahingehend erweitert, unter Koordination der Expertise in der CDRmare Forschungsmission gezielt mögliche Optionen für Deutschland zu erarbeiten und zu bewerten, wobei als Zielgröße eine mögliche jährliche CO₂-Entfernung von 10 Mio Tonnen gewählt wurde. Diese Entscheidung war auch durch das sehr positive Feedback der Mittelgeber und der Mitglieder des Expert:innen Forums motiviert. Das Ergebnis, koordiniert

von den projektangestellten Wissenschaftler:innen von GEOMAR und IOW, die sich die Erstautorenschaft teilen, wurde in Form der „10 Mio Tonnen CO₂-Entnahme Challenge“ verfolgt und zur Publikation eingereicht (Yao et al., eingereicht). Insgesamt wurden 10 konkrete Fälle zur CO₂-Entfernung eingehend analysiert, die die Bereiche Alkalinitätserhöhung, Blue Carbon und Artificial Upwelling abdecken. Zudem wurden Szenarien betrachtet, bei denen CO₂-Abscheidungsverfahren, wie sie in CDRterra betrachtet werden, mit CO₂-Speicherung in jungem ozeanischen Basalt und im deutschen Buntsandstein der Nordsee gekoppelt wurden. Eine ausführliche Beschreibung ist im Abschlußbericht des Projektpartners GEOMAR (verantwortlich für das Arbeitspaket) gegeben. Die voll ausführliche Beschreibung ist in dem im Review befindlichen Manuskript gegeben (Yao et al., eingereicht 2024). Insbesondere sei auf den Annex der Arbeit verwiesen, in dem auf <50 Seiten die erfolgten Review-Arbeiten und Analysen der einzelnen Optionen dokumentiert sind. Diese Arbeit fasst alle Meilensteine des WP2 zusammen, was erforderlich war, um eine umfassende, publizierfähige Darstellung zu ermöglichen. Die eingereichte Version ist auf einem PrePrint Server zugänglich ([Yao et al. 2024](#)).

Im Rahmen der Arbeiten zu Task 1.5, aber insbesondere für die Arbeiten zu AP 2, die in dem Manuskript zur 10 MT-Challenge mündeten, war technische und ingenieurwissenschaftliche Expertise erforderlich. Diese war im Konsortium aufgrund einer klaren Aufforderung im Rahmen des Begutachtungsprozesses durch einen Unterauftrag realisiert worden. Während die Einbringung in AP1 aufgrund der fehlenden klaren Szenarien und des nicht ausreichenden Kenntnisstands zu CDR-Methoden oft erschwert war, waren die Arbeiten im Bereich des AP 2 von immenser Bedeutung und essentiell. So waren die für die plausiblen Szenarien der Anwendung einzelner Szenarien Recherchen zu erforderlicher Infrastruktur und Energiebedarf, vorhandenen technischen Reifegrad, sowie in einigen Fällen grobe Berechnung von Investitionskosten, für die Durchführung unverzichtbar. Zudem ermöglichte die breite Aufstellung des Unterauftragnehmers, auch verlässliche Information zu beispielsweise dem Energiebedarf von Direct-Air Capture, Land- und See-Logistik, oder dem derzeitigen Gesamtumfang von relevantem Gesteinsabbau abzurufen. Hier zeigte sich, dass eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Ingenieuren essentiell ist, insbesondere bei der Projektdefinition, der Berücksichtigung wissenschaftlicher Mechanismen und der Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden, um die Realisierbarkeit in Deutschland zu erhöhen.

AP 3 - Bewertung einzelner Mariner CDR-Methoden und Interim-Synthese

Task 3.1 - Transdisziplinäre Bewertungen von vorgeschlagenen (Gruppen von) marinen CDR-Optionen und

Task 3.2 - Zusammenfassender Bericht zu Wissenslücken und zukünftigem Forschungsbedarf

Für die Anwendung des transdisziplinären Bewertungsrahmens wurden vier hypothetische Testfälle (Szenarien) durch das ASMASYS-Team entwickelt, die in mehreren TETs angewendet wurden. Dadurch konnten zum einen der Bewertungsrahmen verfeinert und zum anderen vier unterschiedliche CDR-Optionen getestet werden. Eine Übersicht zu den Testfällen befindet sich in Tabelle 4 dieses Berichts. Des Weiteren wurden Teile der Bewertung des derzeitigen Entwicklungsstands und des Potentials für Umsetzung mit deutscher Beteiligung in der aufwändigen Arbeit zur 10 MT Challenge einbezogen.

Der zukünftige Forschungsbedarf ist in der Antragstellung zur zweiten Förderphase für die Forschungsmission CDRmare ausführlich aufgezeigt worden, sowie im Rahmen der Diskussion mit Stakeholdern und Mittelgebern, so dass eine weitere Vertiefung im Rahmen von ASMASYS zugunsten der Arbeiten, die Mehraufwand erforderten (AP 1.5 und 2) zurückgestellt wurde. Eine klar übermittelte Botschaft war, dass die Kräfte in Hinblick auf die Expertise in

Rechts- und Sozialwissenschaften, sowohl in Hinblick auf die wissenschaftlichen Fragestellungen wie auch in Hinblick auf den bestmöglichen Diskurs mit Expert:innen und Stakeholdern, gebündelt werden sollte. Die Stärkung des Verbundes ASMASYS in der Phase II, und insbesondere die Einführung des “Social Science and Humanities Hub” zeigt, dass dieser Empfehlung, formuliert sowohl aus dem Konsortium heraus wie auch durch die Evaluation der zweiten Phase, Rechnung getragen wurde. Die Bedeutung eines transdisziplinären Bewertungsrahmens und der stark disziplinübergreifenden Forschung unter direkter Einbeziehung der potentiellen Akteure wurde vom Fördermittelgeber, was an der erweiterten Bedeutung und finanziellen Aufwertung in der zweiten Förderphase von CDRmare ersichtlich ist. (M 3.1.2)

Taks 3.2 - Zwischen-Synthese

Zum Ende der Projektlaufzeit von ASMASYS I wurde eine Zwischen-Synthese (Kreuzburg et al., 2024) erstellt. Die Verwendung des Begriffs “Zwischen” verdeutlicht, dass sich dieser Bericht aus den Arbeiten der ersten Förderphase der Forschungsmission CDRmare und dessen Verbund ASMASYS speist und somit einen Zwischenstand vor der Weiterführung der Forschung in der zweiten Förderphase darstellt. Der Bericht gibt zunächst einen Überblick über marine Carbon Dioxide Removal (mCDR)- und Carbon Storage (mCS)-Technologien in Deutschland.

Nach einer Einführung werden der aktuelle Rechtsrahmen sowie politische Zielsetzungen erläutert. Zudem wird die öffentliche Wahrnehmung dieser Technologien analysiert, wobei gesellschaftliche Debatten, Akzeptanzprobleme und Kommunikationsstrategien im Mittelpunkt stehen.

Ein zentraler Abschnitt behandelt den transdisziplinären Bewertungsrahmen, der zur systematischen Einschätzung von mCDR- und mCS-Technologien entwickelt wurde. Der Bewertungsrahmen und dessen Aufbau werden ausführlich dargestellt. Es wird auf die Begrifflichkeiten Machbarkeit (Feasibility) und Erwünschtheit (Desirability), die identifizierten sieben Dimensionen technisch-ökologische Machbarkeit, politische Machbarkeit, rechtliche Machbarkeit, Wirksamkeit, wirtschaftliche Effizienz, Gerechtigkeit, Umweltethik eingegangen. Der zugrundeliegende Indikatoren-Pool sowie die in Fragen formulierten Kriterien sind im Anhang einsehbar. Der Konzeptnachweis mit Testfällen wird ebenso geführt. Zudem wird die Herausforderung einer jährlichen CO₂-Entnahme von 10 Millionen Tonnen in Deutschland thematisiert, wobei technische, infrastrukturelle und gesellschaftliche Aspekte betrachtet werden. Anschließend wird untersucht, inwieweit die Leitfragen des Bewertungsrahmens für eine strukturierte Entscheidungsfindung genutzt werden können.

In einem eigenen Kapitel wird der Erforschung der marinen CO₂-Entnahme in Deutschland nachgegangen. Zwei zentrale Ansätze werden betrachtet: die Erhöhung der Alkalinität im Ozean zur Steigerung der CO₂-Aufnahme und die Akkumulation von blauem Kohlenstoff in marinen Ökosystemen. Beide Methoden werden hinsichtlich ihrer Methodik, ihres Potenzials, ihres Reifegrades sowie der öffentlichen Wahrnehmung bewertet.

Ein weiteres Kapitel widmet sich der Erforschung der marinen Kohlenstoffspeicherung in Deutschland. Dabei stehen wiederum zwei Verfahren im Fokus: die Speicherung in der Tiefseekruste und die submarine Speicherung in geologischen Buntsandstein-Formationen. Beide Technologien werden methodisch analysiert, gesellschaftlich eingeordnet und entlang der sieben Bewertungsdimensionen bewertet.

Insgesamt bietet der Bericht eine fundierte Analyse der regulatorischen, technologischen und gesellschaftlichen Aspekte von mCDR- und mCS-Technologien. Er zeigt die Potenziale und Herausforderungen dieser Ansätze auf und stellt eine Grundlage für zukünftige Entscheidungen in Deutschland dar (M 3.2.1).

Es sei erwähnt, dass die Konzeption des Berichts in Hinblick auf Ausrichtung und Umfang unter Konsultation und auch Iteration mit einigen der Expert:innen und Stakeholdern erfolgte, um ein für Akteure nützliches und nutzbares “Produkt” einer Zwischen-Synthese zu generieren. Aus diesem Grunde wurde der Bericht auch in Deutsch und Englisch fertiggestellt und ist über die CDRmare Webseite erhältlich ([Kreuzburg et al. 2024](#)). Er enthält auch eine - abgestimmte - Danksagung an die involvierten Akteure.

Der Erkenntnisse aus der Forschungsmission CDRmare, und hier sehr stark die des ASMASYS-Verbundes, sind in die Entwicklung der Langfriststrategie Negativemissionen des BMWK eingegangen (M 3.2.2). Dies konnte unter anderem durch die starke Transferarbeit, die im Verbund geleistet wurde, erreicht werden (siehe AP4).

AP4 - Transfer

Der Transferbaustein der Forschungsmission CDRmare war im Verbund ASMASYS angesiedelt. Das Gros der Organisation von Veranstaltungen zum Transfer von wissenschaftlichen Diskussionen und Ergebnissen in Politik und Gesellschaft lag in der Verantwortung des GEOMAR. Gleichwohl haben ASMASYS-Wissenschaftler:innen zu unterschiedlichen Veranstaltungsformaten inhaltlich beigetragen. Besonderen Anteil daran hatte der Verbundleiter, auch in seiner Rolle als einer der beiden Co-Sprecher. Besonders zu erwähnen sind die *Factsheets* zu allen Verbundprojekten sowie die Insights, die auch bald fertiggestellt sind und für das ASMASYS Projekt in Deutsch und Englisch bereits in der Materialiensammlung der CDRmare-Webseite zu finden sind. Ein Update der Sammlung der Factsheets wurde zudem als Monographie erstellt.

Die Factsheets geben auf ca. 8 Seiten kompaktes Wissen zur Forschung der Verbänden wieder. Das ASMASYS-Team hat zu einer Reihe von Factsheets und deren regelmäßiger Überarbeitung beigetragen. Beispielhaft sei hier auf die Factsheets zum Bewertungsrahmen hingewiesen, sowie auf das Factsheet zu den chemischen Grundlagen (CDRmare, 2023).

Ein wichtiges Produkt des ASMASYS-Verbundes war die Zusammenfassung der Zwischen-Synthese (Kreuzburg et al., 2024) für Entscheidungsträger:innen unterstützt durch eine grafische Aufbereitung des Inhalts. Dafür wurde ein weiteres Veröffentlichungsformat der Forschungsmission, die *Insights* genutzt (Löschke et al., 2025). Die Insights geben, anders als die Factsheets, die wichtigsten Punkte des über den Projektverlauf gewonnenen neuen Erkenntnisse wieder. Im Rahmen der ASMASYS Insights wurde die Notwendigkeit einer transdisziplinären Bewertung von mCDR-Maßnahmen, die wichtigsten Charakteristika des ASMASYS-Bewertungsrahmens, sowie eine Liste von Empfehlungen zum Procedere der Bewertung eines mCDR-Vorschlags, in den Mittelpunkt gestellt.

Es hat sich gezeigt, dass diese Dokumente als Übersichtsdokumente und Leitfäden viel beachtet sind, zum Beispiel bei der Aufnahme der Arbeiten der Deutschen Energie-Agentur (dena) zur Konzeption der Langzeitstrategie Negativemissionen (LNe).

Eine ausführliche Übersicht über die Arbeiten im Bereich Transfer der gesamten Mission CDRmare ist im Bericht des Verbundpartners GEOMAR gegeben.

Ein wichtiges Produkt des ASMASYS-Verbundes war die Zusammenfassung der Zwischen-Synthese für Entscheidungsträger:innen, unterstützt durch eine grafische Aufbereitung des Inhalts. Dafür wurde ein weiteres Veröffentlichungsformat der Forschungsmission, die *Insights* genutzt (Löschke et al., 2025) (M 4.2.5).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil der zur Verfügung gestellten Mittel wurde für die Finanzierung des Personals ausgegeben. Finanziert für das Projekt waren zwei Postdocs (1 x Wissenschaft; 1 x Koordination und Management), kurzzeitig ein Programmierer und eine Hilfskraft. Aufgrund von späterer Stellenbesetzung und früherem Ausscheiden der Person auf der wissenschaftlichen Postdoc-Stelle bzw. Ausscheiden und Neueinstellung der Postdoc für Management und Koordination waren mehrere Personen in Folge für das Projekt angestellt. Die personellen Wechsel haben zu keinem Zeitpunkt die Erreichung der Projektziele gefährdet. Die Verstärkung des wissenschaftlichen Managements in den letzten acht Monaten des Projekts war in Hinblick auf die Fertigstellung der Projektaufgaben und insbesondere der Zwischen-Synthese sogar förderlich.

In den sächlichen Verwaltungskosten sind folgende Posten enthalten: Die Vergabe eines Unterauftrages zum Technologie-Assessment, Dienstreisen sowie die Organisation der Jahrestreffen des Verbundes. Darüber hinaus sind finanzielle Mittel in die Übernahme von Reisekosten externer Expert:innen zu den Think and Exchange Tanks sowie deren Veranstaltungsorganisation geflossen.

Aufgrund von Minderausgaben (bspw. wegen eines geringeren Anteils an abrechenbaren Reisekosten zu den TETs) hat das IOW im Juli 2024 Mittel zur Kürzung angeboten.

Eine ausführliche Darstellung der Mittelverwendung sowie der Nachweise ist bereits übermittelt worden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts ASMASYS durchgeführten Arbeiten erwiesen sich als notwendig und angemessen, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Die entwickelten wissenschaftlichen Ansätze, insbesondere der transdisziplinäre Bewertungsrahmen für marine CDR-Optionen, basieren auf einem interdisziplinären Austausch sowie der Einbeziehung von Stakeholdern und stellen eine wesentliche Innovation im Forschungsfeld dar.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete folgte im Wesentlichen der ursprünglichen Planung, wobei einige Anpassungen erforderlich waren, um auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse sowie den Diskussionsbedarf mit Stakeholdern zu reagieren. Die Think-and-Exchange-Tank-Treffen (TETs) trugen entscheidend zur Validierung und Weiterentwicklung des Bewertungsrahmens bei. Die iterative Entwicklung, basierend auf interdisziplinären Diskussionen und Rückmeldungen von Stakeholdern, war zeitaufwändiger als ursprünglich vorgesehen, führte jedoch zu einem fundierten und breit akzeptierten Bewertungsansatz. Teilweise musste die Arbeit an den disziplinären Fragestellungen (Task 1.1.) zugunsten der Federführung der verbundübergeordneten Ziele verschoben werden, weil erstere eben nicht kritisch in Hinblick auf weiterführende Arbeiten waren. Umso erfreulicher ist es, berichten zu können, dass auch diese disziplinären Arbeiten noch mit der Einreichung eines Manuskripts abgeschlossen wurden (Morganti et al., 2024).

Die Anwendung auf hypothetische Testfälle (Szenarien), erlaubte eine gezielte Verfeinerung der Bewertungsmethodik. Die Einbindung externer Expert:innen sowie der Austausch mit politischen Akteur:innen ermöglichten eine praxisnahe Anpassung und die Verortung der Ergebnisse im aktuellen klimapolitischen Diskurs.

Die wissenschaftlichen Publikationen und Präsentationen auf Konferenzen sowie der Wissenstransfer über Vorträge, Workshops und Veröffentlichungen verdeutlichen den nachhaltigen Wert der Projektarbeiten. Der im Projekt entwickelte Bewertungsrahmen wird über die

Projektlaufzeit hinaus eine Grundlage für zukünftige Forschungsansätze in der zweiten Förderphase der Forschungsmission CDRmare bilden.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse bieten einen hohen wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Nutzen. Insbesondere der entwickelte transdisziplinäre Bewertungsrahmen für marine CO₂-Entnahme-Methoden stellt ein innovatives Instrument dar, das über die Laufzeit des Projekts hinaus Anwendung finden wird. Durch seine interdisziplinäre Ausrichtung, die wirtschaftliche, rechtliche, ethische und politisch-institutionelle Aspekte berücksichtigt, ermöglicht der Bewertungsrahmen eine ganzheitliche Analyse mariner CO₂-Entnahmeverfahren. Damit leistet das Projekt einen essentiellen Beitrag zur wissenschaftlichen und politischen Debatte über negative Emissionstechnologien in Deutschland, Europa und darüber hinaus.

Über die enge Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft wird sichergestellt, dass die Forschungsergebnisse langfristig in internationale Diskurse eingebracht werden. So ist die ASMASYS-Forschung beispielsweise in die Arbeit der GESAMP Working Group 41 eingeflossen, die ein integriertes Bewertungsframework für marine Klimainterventionen erarbeitet.

Durch sowohl die wissenschaftlichen als auch die transfer-orientierten Publikationen wird sichergestellt, dass die Erkenntnisse aus dem Projekt eine langfristige Wirkung entfalten und einen wesentlichen Beitrag zur Gestaltung zukünftiger Klimapolitiken leisten.

Ausrichtung und Zielsetzung des ASMASYS Projekts wurden im Rahmen der Evaluierung der Forschungsmission erkannt, was sich in der erhöhten Förderung in der zweiten Phase von CDRmare unter Ausbau des transdisziplinären Charakters widerspiegelt. Damit ist die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit voll erreicht.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der im Projekt entwickelte Bewertungsrahmen hat aufgrund seiner inter- und transdisziplinären Ausrichtung ein Alleinstellungsmerkmal. Er beschränkt sich nicht auf eine technokratische Machbarkeitsanalyse, sondern auch die gesellschaftliche Wünschbarkeit von marinen CDR-Maßnahmen wird berücksichtigt. Obwohl die Forschungsaktivitäten im Bereich CDR, auch im marinen Bereich, sowie das öffentliche und politische Interesse hieran über die Projektlaufzeit geradezu explosionsartig gestiegen ist, blieb die Zielsetzung und Ausrichtung von ASMASYS hochaktuell und musste im Kern nicht angepasst werden.

6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF

im Review, in Einreichung

Baatz, C.; Tank, L.; Bednarz, L.; Boettcher, M; **Morganti, T.**; Voget-Kleschin, L.; Cabus, T.; Doorn, E. van; **Holz Hüter, W.**; Keller, D.; **Kreuzburg, M.**; Matz-Lück, N.; Mengis, N.; Merk,

C.; Oschlies, A.; **Wehnert, H.**; Yao, W.; **Rehder, G.** (under review in Environmental Research Letters): A Holistic Assessment Framework for Marine Carbon Dioxide Removal Options.

Tank, L.; Voget-Kleschin, L.; Garschagen, M.; Boettcher, M.; Mengis, N.; **Rehder, G.**; Baatz, C. (under review in npj climate action): Distinguish between Feasibility and Desirability when Assessing Climate Response Options.

Morganti, T., Mengis, N., Oschlies, A. et al. (submitted to Environmental Research Letters): Monitoring marine carbon dioxide removal: quantitative analysis of indicators for carbon removed and environmental side-effects.

Yao, W., **Morganti, T.**, Wu, J. et al. (under review in Earth's Future): 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.

2025

Löschke, S., **Kreuzburg, M.**, **Rehder, G.**, Boettcher, M., Tank, L. und Baatz, C. and **ASMASYS-Konsortium** (2025) CDRmare Insights: New guidelines on the uniform and knowledge-based assessment of marine CO₂ removal methods. GEOMAR, Kiel, Germany. DOI: 10.3289/CDRmare.45.

Löschke, S., **Kreuzburg, M.**, **Rehder, G.**, Boettcher, M., Tank, Lukas und Baatz, C. and **ASMASYS-Konsortium** (2024) CDRmare Insights: Neuer Leitfaden: Marine CO₂-Entnahmemethoden und -projekte einheitlich und wissensbasiert bewerten. GEOMAR, Kiel, Germany, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.40.

Morganti, T., Mengis, N., Oschlies, A. et al. Monitoring marine carbon dioxide removal: quantitative analysis of indicators for carbon removed and environmental side-effects. Pre-Print, ESS Open Archive. DOI: 10.22541/essoar.173712519.98707691/v1

2024

Amann, T., Baatz, C., Böttcher, M., Geden, O., Keller, D. P., Kopf, A., Merk, C., Milinski, S., Mintenbeck, K., Oschlies, A., Pongratz, J., Proelß, A., **Rehder, G.**, Rickels, W., Riebesell, U., Sswat, M., Tank, L., Wallmann, K., Westmark, L., Wölfelschneider, M. und Zimmer, M. (2024) World Ocean Review: The Ocean – A Climate Champion? How to Boost Marine Carbon Dioxide Uptake. Open Access. World Ocean Review, 8. Maribus, Hamburg, Germany, 243 pp. ISBN 978-3-86648-733-8

CDRmare (2024) Gezielte Kohlendioxid-Entnahme: Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden. CDRmare Research Mission, 64 pp. DOI 10.3289/CDRmare.27_V2.

CDRmare (2024) Policy Brief, Chancen und Hürden der marinen geologischen CO₂-Speicherung. CDRmare Research Mission, 14 pp. DOI 10.3289/CDRmare.15_V2.

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.37

Kreuzburg, M., Baatz, C., Bednarz, L., Böttcher, M., Merk, C., **Morganti, T.**, Tank, L., Yao, W., **Wehnert, H.**, **Rehder, G.**, (2024). Bewertungsrahmen für marine CO₂-Entnahme und

Synthese des aktuellen Wissenstandes, ASMASYS, Rostock, Germany. DOI 10.3289/CDRmare.38

Oschlies, A., N. Mengis, **Rehder, G.**, E. Schill, H. Thomas, K. Wallmann und M. Zimmer (2024). Mögliche Beiträge geologischer und mariner Kohlenstoffspeicher zur Dekarbonisierung. In: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Ed. by G. P. Brasseur, D. Jacob and S. Schuck-Zöller. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 449-458, doi: 10.1007/978-3-662-66696-8_35

Yao, W., **Morganti, T.**, Wu, J. et al. 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. preprint, *ESS Open Archive*. DOI: 10.22541/essoar.171650351.11778445/v1

Löschke, S. und Kopf, A. and AIMS3-Konsortium (2024) Neues Wissen zur CO₂-Speicherung in ozeanischer Kruste: Die sechs wichtigsten Erkenntnisse aus der AIMS3-Forschung. GEOMAR, Kiel, Germany, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.39.

2023

Amann, T., Baatz, C., Böttcher, M., Geden, O., Keller, D. P., Kopf, A., Merk, C., Milinski, S., Mintenbeck, K., Oschlies, A., Pongratz, J., Proelß, A., **Rehder, G.**, Rickels, W., Riebesell, U., Sswat, M., Tank, L., Wallmann, K., Westmark, L.,...Zimmer, M. (2023). World Ocean Review: Klimaretter Ozean? Wie das Meer (noch) mehr Kohlendioxid aufnehmen soll. Maribus. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/59429/>

CDRmare (2023) An assessment framework for marine carbon dioxide removal methods. CDRmare Research Mission, 4 pp. DOI [10.3289/CDRmare.28](https://doi.org/10.3289/CDRmare.28).

CDRmare (2023) Artificial upwelling: More power for the ocean's biological carbon pump. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.31.

CDRmare (2023) Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden - Version 2. CDRmare Research Mission, 4 pp. DOI 10.3289/CDRmare.25_V2.

CDRmare (2023) Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste - Version 3. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.10_V3.

CDRmare (2023) Increased carbon storage through the expansion of marine meadows and forests. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.33.

CDRmare (2023) Knowledge summary, A deep-sea experiment on carbon dioxide storage in oceanic crust - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.20_V2.

CDRmare, Asmasys (2023) Knowledge Summary, An assessment framework for marine carbon dioxide removal methods. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.29.

CDRmare (2023) Knowledge summary, Increased carbon storage through the expansion of marine meadows and forests. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.32.

CDRmare (2023) Knowledge summary, Minerals for enhanced carbon dioxide uptake by the ocean - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.22_V2.

CDRmare (2023) Knowledge summary: Societal pressure to act – Removing carbon dioxide from the atmosphere: urgently needed - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.17_V2.

CDRmare (2023) Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee - Version 4. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.06_V3.

CDRmare (2023) Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres - Version 2. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.14_V2.

CDRmare (2023) Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans - Version 2. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.12_V2. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58957/>

CDRmare (2023) Minerals for enhanced carbon dioxide uptake by the ocean - Version 2. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.23_V2.

CDRmare (2023) The Earth's natural carbon cycle – Carbon reservoir ocean: How the sea absorbs carbon dioxide - Version 2. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.24_V2.

CDRmare (2023) Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres - Version 2. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI 10.3289/CDRmare.08_V2. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58952/>

CDRmare (2023) Wissen kompakt, Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste - Version 3. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.09_V3.

CDRmare (2023) Wissen kompakt, Gesellschaftlicher Handlungsdruck – Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre: Dringend benötigt - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.03_V2.

CDRmare (2023) Wissen kompakt, Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.13_V2.

CDRmare (2023) Wissen kompakt, Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans - Version 2. CDRmare Research Mission, 2 pp. DOI 10.3289/CDRmare.11_V2.