



Sachbericht zum Verwendungsnachweis TEIL I - Kurzbericht

RETAKE-A (GEOMAR)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Förderkennzeichen: 03F0895A
Vorhabenbezeichnung: RETAKE-A (GEOMAR)
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 – 31.07.2024

Autor:innen

Andy W. Dale, Michael Fuhr, Neha Mehendale, Andreas Oschlies, Mirjam Perner, Ulf Riebesell,
Christiane K. Schelten, Carsten Spisla

Datum

24. Januar 2025



1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

Erläuterung: RETAKE ist eins von sechs Forschungsverbänden der Forschungsmission „Marine Kohlenstoffsenken in Dekarbonisierungspfaden“ der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM e. V.), deren 1. Sprecher Prof. Andreas Oschlies (GEOMAR) ist. Die am GEOMAR ausgerichteten Arbeitspakete (01. / 0.4 / 1.3 / 1.4 / 3.2 / 3.3) sind Teil des Verbunds RETAKE „CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken (RETAKE)“, der ebenfalls von Prof. Andreas Oschlies (GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel) geleitet wird.

AP0.1/AP0.4/AP0.5: Maßnahmen und Infrastruktur zur Stärkung der Zusammenarbeit durch Förderung des wissenschaftlichen Austauschs und des internen Informationsflusses wurden bereitgestellt. Zudem wurde eine gemeinsame Außendarstellung gewährleistet und eine transparente Kommunikationsstrategie in die Gesellschaft sichergestellt. Der Gesamtfortschritt von RETAKE wurde durch gezielte Koordination und Management gefördert. Besonderer Fokus lag auf dem Austausch und der Zusammenarbeit zwischen den Arbeitspaketen sowie der Vernetzung mit anderen Verbänden. Die praktische Relevanz und Anschlussfähigkeit der durchgeführten Forschung wurde durch Interaktionsformate mit der Wissenschaft und Stakeholdern (Wirtschaft, Industrie und Gesellschaft) sowie durch zielgruppenspezifische Übersetzungen und Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse aktiv unterstützt.

AP1.2: Ziel war es, potenzielle Risiken einer großskaligen Alkalinisierung zu identifizieren und zu minimieren, bevor entsprechende Methoden in die Anwendung gehen können. Dazu sollten Labor-Kulturversuche an verschiedenen Schlüsselgruppen von Organismen sowie eine darauf aufbauende, großskalige Mesokosmen-Studie als Feldtest der im Labor gewonnenen Ergebnisse durchgeführt werden. Zu Beginn des Vorhabens (2021) wurde eine Datenrecherche bereits existierender Datensätze zu Ozeanalkalinisierung durchgeführt sowie Kulturexperimente begonnen. Diese Experimente wurden im zweiten Jahr des Vorhabens (2022) abgeschlossen und ausgewertet. Zentraler Baustein in 2023 war die Planung, Durchführung sowie teilweise Auswertung des pelagischen Mesokosmen-Experimentes zu den ökologischen und biogeochemischen Auswirkungen von Ozean-Alkalinisierung.

AP1.4: Das übergeordnete Ziel dieses Arbeitspakets war es die verstärkte benthische Verwitterung von alkalischen Mineralien als CDR-Strategie zu untersuchen und die entsprechenden Umweltauswirkungen zu untersuchen. Für die Labor- und Benthokosmenexperimente wurden zwei Gesteinsarten verwendet: Kalziumkarbonat (Kalkstein) und ein mafisches Silikatgestein (Dunit), die beide derzeit als potenzielle Kandidaten für eine großflächige Erhöhung der Alkalität des Meerwassers gelten. Zu Beginn des Projekts war die Durchführbarkeit der Auflösung dieser Minerale in brackischem Ostseewasser unbekannt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Erforschung der Auflösungsraten von Mineralien in Kurzzeit- (Wochen) und Langzeitexperimenten (ein Jahr) mit Sedimenten aus der Kieler Bucht, unterstützt durch numerische biogeochemische Modellierung.

AP3.2: Ziel dieses Arbeitspakets war es, mithilfe eines Erdsystemmodells mit interaktivem Kohlenstoffkreislauf die Effizienz und biogeochemischen Auswirkungen der Alkalinitätserhöhung als Methode zur CO₂-Entnahme zu bewerten. Dazu wurden verschiedene Einbringungsmethoden für großflächige europäische Küstengebiete sowie für individuelle nationale Regionen und einzelne Flussmündungen simuliert, um die jeweiligen Muster und Treiber der Kohlenstoffaufnahme zu bestimmen.

AP3.3: Ziel des Teilprojektes war es, der RETAKE Arbeitsgruppe am IfW die Ergebnisse von am GEOMAR betriebenen Simulationen mit einem vereinfachten Erdsystemmodell bezüglich der Auswirkungen von verschiedenen Anwendungen der Alkalinitätserhöhung unter verschiedenen Emissionsszenarien bereitzustellen.

1.2 Ablauf des Vorhabens

AP0.1/AP0.4/AP0.5: Im Rahmen der Forschungsmission wurde ein umfassendes Kommunikationskonzept entwickelt, das klare Strukturen, feste Termine und Verantwortlichkeiten für den regelmäßigen Austausch zwischen den Verbänden und Partnern festgelegt hat. Ein gemeinsames Symposium mit CDRterra wurde ausgerichtet sowie ein *Special Issue* koordiniert, um die Ergebnisse von CDRmare weiter zu verbreiten und den Austausch auf globaler Ebene zu fördern. Die Aktivitäten im RETAKE Forschungsverbund umfassten die Berichterstattung, die Kommunikation wissenschaftlicher Entscheidungen, die Abstimmung mit Management und Öffentlichkeitsarbeit sowie die Planung von Sitzungen und Workshops. Zur Stärkung der

Netzwerkbildung, der Vermittlung des Forschungsstands und der Entwicklung erster Pilotierungsansätze für Ozean-Alkalinisierung fanden Workshops mit der Industrie und Wirtschaft statt. Zentral im RETAKE Transfer war die Netzwerkbildung mit Stakeholdern aus Politik, Behörden und NGOs.

AP1.2: Es wurde eine umfangreiche Datenrecherche innerhalb der verfügbaren Datensätze zum Einfluss von Alkalinisierung auf Planktonorganismen durchgeführt sowie in einem Laborkultur-Experiment, Wachstums- und Kalkbildungsraten der Kalkalge *Emiliana huxleyi* bei unterschiedlichen Alkalinitätserhöhungen gemessen. Außerdem wurden drei Schlüsselgruppen marinen Phytoplanktons unterschiedlichen Nickelkonzentrationen ausgesetzt und ihre Sensitivität gegenüber diesem toxischen Stoff untersucht. Im Rahmen eines Flaschenexperimentes wurde der Einfluss von CO₂-äquibrierter und nicht-äquibrierter Alkalinisierung auf eine natürliche Planktongemeinschaft untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einer Mesokosmen-Studie auf Helgoland überprüft.

AP1.4: In Laborexperimenten mit Sedimentkernen sowie Benthokosmenexperimenten wurde die Zugabe von Kalzit und Dunit untersucht. Es wurden regelmäßig Proben für biogeochemische und mikrobielle Analysen genommen, um die Hauptfaktoren für die Mineralauflösung unter verschiedenen Umweltbedingungen zu ermitteln und mit Simulationen von Reaktionstransportmodellen am und im Meeresboden zu vergleichen. In den mit Sediment gefüllten und Mineralien angereicherten Benthokosmenexperimenten konnte zudem die Mineralienauflösung über einen Jahresgang unter variierenden Bedingungen untersucht werden. Die Ergebnisse der Benthokosmenexperimente wurden für eine großskalige Abschätzung in ein Box-Modell für die Kieler Bucht integriert.

AP3.2: Das Erdsystemmodell FOCl (Flexible Ocean and Climate Infrastructure) wurde für Simulationen der Alkalinitätserhöhung in verschiedenen Regionen der zum Nordatlantik offenen europäischen Küste verwendet. Untersucht wurden vor allem die Auswirkungen verschiedener Emissionsszenarien, der internen Variabilität von saisonaler bis hin zu dekadischer Variabilität, der Erhöhung der Alkalinität auf verschiedenen Skalen und der Modellauflösung auf die simulierte Effizienz.

AP3.3: Eine Anzahl von Simulationen zur Alkalisierung wurde mit dem *UVic Earth System Model of Intermediate Complexity* durchgeführt und für die Kalibration des am IfW betriebenen und in das globale DICE Modell integrierten BEAM-Kohlenstoffkreislaufmodells verwendet.

1.3 Wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

AP0.1/AP0.4/AP0.5: Es wurde eng mit den Partner-Institutionen der fünf anderen Verbünde zusammengearbeitet. Mit dem *Code of Conduct* und den *Guidelines for Responsible Research and Innovation* wurden zwei wichtige CDRmare Grundsatzdokumente erstellt. Ein Policy Brief zur Ozean-Alkalisierung wurde in diversen Dialog-Formaten genutzt. Im Transfer wurde ein nachhaltiges Netzwerk mit Stakeholdern aus Industrie und Wirtschaft aufgebaut.

AP1.2: Die Frage nach möglichen Risiken und Nebenwirkungen für die marinen Ökosysteme durch Alkalinisierung wurde durch Kultur- und Feldexperimente umfassend beleuchtet. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden bei der Evaluierung und Planung möglicher Anwendungen. Alle Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit dem AWI Helgoland gewonnen.

AP1.4: Die wichtigsten Ergebnisse sind: (1) Kalzit ist das bevorzugte Mineral für die Zugabe auf Ostseesedimente für CDR. Kalzit löst sich schneller und ist kostengünstiger als Dunit. (2) Der Sättigungszustand des Bodenwassers ist ein entscheidender Faktor. (3) Die Auflöseraten können durch bestimmte Mikroorganismen im Sediment sowie aktiver Infauna stark erhöht werden. (4) Die CO₂-Aufnahme durch Kalzitanreicherung des Meeresbodens in der Ostsee dürfte mehrere Megatonnen pro Jahr betragen.

AP3.2: Wichtigste Ergebnisse sind: (1) Das Ausmaß der Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean durch Alkalinitätserhöhung hängt vom Hintergrundklima ab. (2) Das Verhältnis der CO₂-Aufnahme innerhalb und außerhalb der Ausbringungsregion ist nicht szenarioabhängig. (3) Das Ausmaß der Aufnahme hängt von kleinräumigen Effekten ab. (4) Es gibt regionale Unterschiede bei der Aufnahme in verschiedenen geografischen Abschnitten der nordatlantischen Küste Europas.

AP3.3: Die am GEOMAR gerechneten Simulationen zu marinem CDR mit einem Erdsystemmodell wurden in enger Absprache mit der RETAKE-Arbeitsgruppe am IfW konfiguriert, durchgeführt und passgenau für eine erfolgreiche Kalibration des dortigen Integrated Assessment Modells verwendet.



Sachbericht zum Verwendungsnachweis TEIL II - Eingehende Darstellung

RETAKE-A (GEOMAR)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Förderkennzeichen: 03F0895A
Vorhabenbezeichnung: RETAKE-A (GEOMAR)
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 – 31.07.2024

Autor:innen

Andy W. Dale, Michael Fuhr, Neha Mehendale, Andreas Oschlies, Mirjam Perner, Ulf Riebesell,
Christiane Schelten, Carsten Spisla

Datum

24. Januar 2025



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 13GW0354C gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung tragen die Autor*innen.

II.1 Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen

RETAKE ist eins von sechs Forschungsverbänden der Forschungsmission „Marine Kohlenstoffsenken in Dekarbonisierungspfaden“ der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM e. V.), deren 1. Sprecher Prof. Andreas Oschlies (GEOMAR) ist. Die am GEOMAR ausgerichteten Arbeitspakete (01. / 0.4 / 1.3 / 1.4 / 3.2 / 3.3) sind Teil des Verbunds RETAKE „CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken (RETAKE)“, das ebenfalls von Prof. Andreas Oschlies (GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung Kiel) geleitet wird (Abb.1).

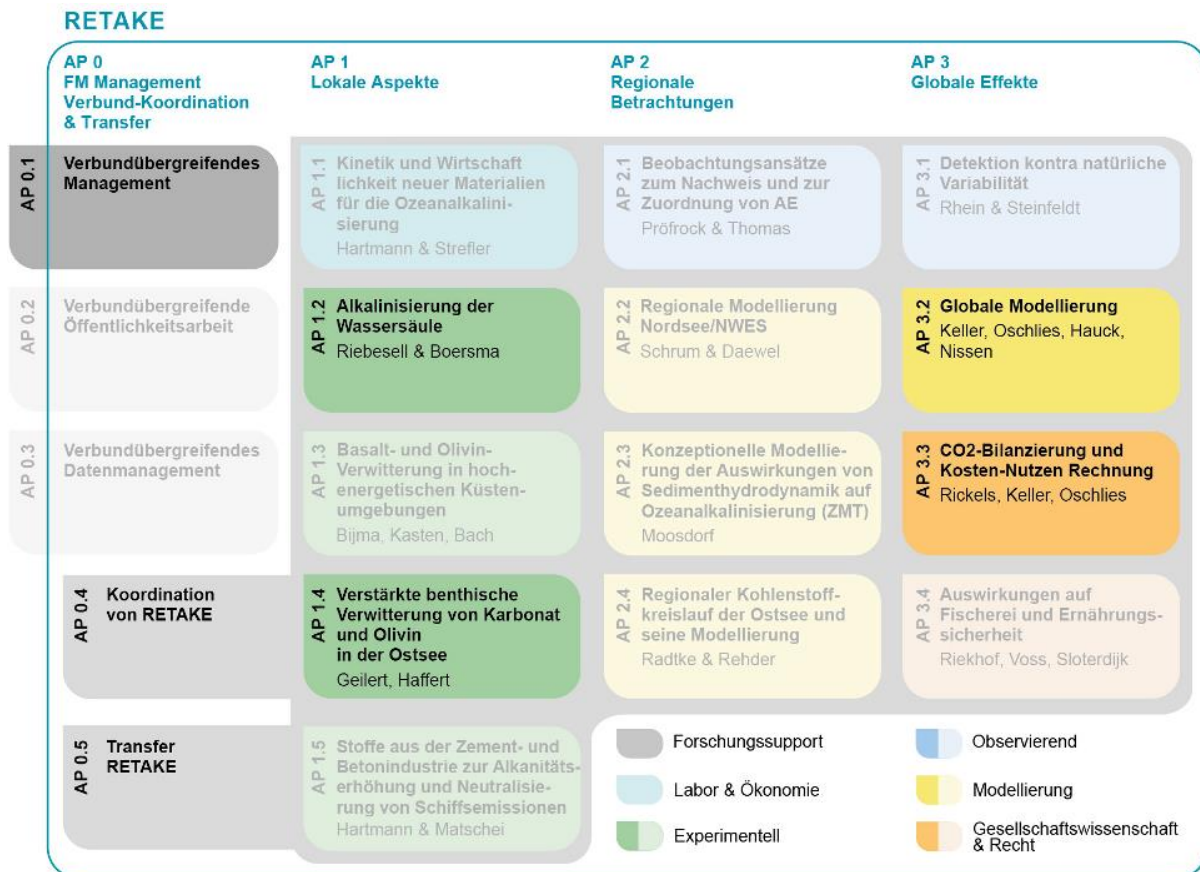


Abb.1: Die hervorgehobenn Arbeitspakete in dieser Übersichtsdarstellung von RETAKE finden am GEOMAR statt.

AP0.1: Verbundübergreifendes Management (= CDRmare Management)

Die CDRmare Managerin nahm an sämtlichen Jahresveranstaltungen der Forschungsverbände teil (vor Ort oder online) und informierte dabei über vergangene und geplante Aktivitäten des übergeordneten Managements. Sie sammelte Anregungen und Wünsche insbesondere für den Austausch zwischen den Konsortien, die interne Kommunikation und die Vernetzung innerhalb der Forschungsmission und stand für Rückfragen zur Verfügung.

Die interne Kommunikationsplattform "Confluence", bereitgestellt vom AWI, war ein wichtiges zentrales Tool für die CDRmare Community, um Informationen zu teilen, zu archivieren und gemeinsam an Dokumenten zu arbeiten. Eine Statistik für diese Confluence-Version steht nicht zur Verfügung. Es wurde jedoch täglich von den CDRmare-Mitgliedern genutzt, viele Informationen, z.B. zu den unterschiedlichen Berichterstattungen, erfolgt in den Verbänden nur über Confluence. Auch die vom GEOMAR bereitgestellte Media-Library wurde von den CDRmare-Mitgliedern genutzt, um große Dateien wie Fotos, Videos, Präsentationen und Aufnahmen von Vorträgen, die Teil der internen CDRmare-Seminarreihe sind, zu

archivieren. Die CDRmare Website sowie die Unterseiten der einzelnen Verbünde wurden regelmäßig mit Neuigkeiten aktualisiert. Info-Grafiken, Layouts, CI-Concept wurden erstellt und überarbeitet.

Gemeinsam mit der CDRmare PR-Verantwortlichen wurden in der Förderperiode sieben interne CDRmare Newsletter herausgegeben. Zudem wurde ein regelmäßiges CDRmare Seminar organisiert, in dem Konsortiumsmitglieder über ihre laufende Forschung berichten, neueste Veröffentlichungen vorstellen oder für CDRmare Themen relevante internationale Gast-Vortragende eingeladen werden.

Es wurden jährliche CDRmare Statustagungen ausgerichtet, deren Teilnahme für die CDRmare Mitglieder verpflichtend gewesen ist. Die erste CDRmare Jahresversammlung fand vom 9.-10. März 2022 in Lüneburg statt und wurde von der damaligen Bundesministerin für Bildung und Forschung Bettina Stark-Watzinger mit einer Videobotschaft eröffnet wurde. Aufgrund der COVID Situation wurde dieses Event hybrid angeboten. Mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler kamen nach Lüneburg, an die 50 Personen, u.a. auch die Mitglieder des CDRmare Scientific Advisory Boards, nahmen virtuell an der Veranstaltung teil. Die CDRmare Managerin hat das übergeordnete Transfermanagement in der Ausrichtung des jährlichen CDRmare Early Career Scientists Treffen unterstützt, das einen Tag vor der offiziellen CDRmare ersten Jahresversammlung in Lüneburg stattfand. Es kamen knapp 60 Doktorierende und Postdoktorierende der sechs Forschungsverbünde zu einem transdisziplinären Training zusammen, das auch der Vernetzung der Nachwuchswissenschaftenden diente. Zudem unterstützte die CDRmare Managerin ein follow-up Meeting der Jahresversammlung vom 8.-10. Nov 2023 im Tagungshaus Drübbberholz mit über 30 Teilnehmenden, die an einem von ASMAYSYS Wissenschaftenden organisierten "10 Mt CO2 Removal Challenge" teilnahmen.

Vom 31. Januar bis 2. Februar 2023 trafen sich Expert*innen aus insgesamt 22 Forschungseinrichtungen, Behörden und Unternehmen zur zweiten Jahresversammlung im Ozeaneum in Stralsund, um eine Halbzeit-Bilanz für die erste Förderphase von CDRmare zu ziehen. Dabei waren mehr als 160 Wissenschaftler*innen sowie Gäste vor Ort und 50 Teilnehmende nutzten das Angebot, online dabei zu sein. Neben der intensiven Diskussion der bisherigen Ergebnisse der Mission diente das Treffen auch dazu, die Forschungsplanung für eine mögliche zweite Förderperiode, die im Sommer 2024 beginnen soll, voranzutreiben.

Im Vorfeld der Jahrestagung fand für Nachwuchswissenschaftler*innen ein interdisziplinärer Kommunikationsworkshop statt, bei denen die Teilnehmenden unter anderem eine fiktive CDRmare Pressekonferenz und Podcast-Interviews nachstellten. Aus den Verbänden nahmen 52 Promovierende und Post-Doktorand*innen an dem Workshop teil. Dies entspricht knapp 90% der CDRmare-Nachwuchswissenschaftler*innen, was wiederum bestätigt, dass es einen hohen Bedarf an dieser Art von Trainings besteht und es ein großes Interesse gibt, sich auch außerhalb des eigenen Forschungsverbundes mit Wissenschaftler*innen zu vernetzen.

Vom 11.-15. March 2024 fand ein gemeinsames Synthese Symposium mit der BMBF Förderlinie CDRterra statt, um zusammen über die Machbarkeit, Potenziale und Risiken von Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre zu debattieren. Mehr als 230 Forschende stellten die Kernergebnisse ihrer fast dreijährigen ersten Projektphase vor und diskutierten diese. Die gemeinsame Jahrestagung der Forschungsprogramme CDRmare und CDRterra begann am ersten Tag mit einer gemeinsamen Auftaktveranstaltung, die die Bundesministerin Frau Stark-Watzinger mit einer Video-Botschaft eröffnet hat. An den zwei Folgetagen tagten die zwei Forschungsmissionen dann zunächst getrennt voneinander, bevor die Wissenschaftler*innen am für die letzten zwei Tage noch einmal zusammengekommen sind, um gemeinsam an übergreifenden Fragestellungen zu arbeiten.

Interdisziplinäre Kommunikation und Selbstvermarktung waren die Schwerpunktthemen des jährlichen Workshops für Nachwuchswissenschaftler*innen, der den offiziellen Auftakt des CDRmare und CDRterra gemeinsamen Synthese Symposiums bildete. Mehr als 45 Postdoktorand*innen und Doktorand*innen aus CDRmare und CDRterra nahmen an den gemeinsamen zwei Tagen teil.

Folgende Treffen wurden weiterhin von der CDRmare Managerin regelmäßig vor- und nachbereitet, sowie geleitet:

- wöchentliche Treffen mit den Co-Sprechern, der CDRmare Transfer Koordinatorin, der Referentin des Co-Sprechers Gregor Rehder
- wöchentliche Treffen des CDRmare Operativen Managements (CDRmare PR-Verantwortliche, CDRmare Datenmanagerin, CDRmare Transfer Team, Verbundmanager*innen)
- monatliche Treffen des CDRmare Vorstands (Co-Sprecher und Verbundsleitungen)
- monatliche Treffen mit den ECS Representatives der sechs Konsortien

Die CDRmare Managerin stand in regelmäßigem Austausch mit der DAM und dem PtJ.

Für das Datenmanagement wurde wie geplant im GEOMAR Repository OceanRep das Projekt CDRmare sowie Projekte für jedes der sechs Verbünde angelegt, so dass die wissenschaftlichen Publikationen mit PIDs wie ORCID und DOI hier zentral auffindbar sind: <https://oceanrep.geomar.de/view/project/CDRmare.date.html>. Das gilt analog auch für das Informationssystem OSIS, auch hier sind die bisher verfügbaren Informationen zum Forschungsausgang unter dem Kontext CDRmare auffindbar.

AP0.4: Koordination von RETAKE (= RETAKE Management)

In enger Zusammenarbeit mit dem RETAKE Verbundkoordinator sorgte das RETAKE Management für einen reibungslosen Ablauf der administrativen Aufgaben von RETAKE und gewährleistete, dass die Projektarbeiten in Übereinstimmung mit den verwaltungstechnischen, operationellen und wissenschaftlichen Anforderungen und Verpflichtungen erfolgen. Zusätzliche wurden durch das RETAKE Management der wissenschaftliche Austausch und die Vernetzung der Wissenschaftler*innen unterstützt und gefördert.

So fand in der Förderperiode drei Statustagungen statt. Am 28. und 29. September 2021 trafen sich in Travemünde für das RETAKE Kick-off Meeting 40 Teilnehmenden vor Ort. Zusätzlich gab es 18 online-Teilnehmer*innen. Im Rahmen dieses ersten Treffens wurden auch zwei RETAKE-Lenkungsgremien etabliert. Das zweite RETAKE Jahrestreffen wurde am 06. und 07. Oktober 2022 in Travemünde durchgeführt (MS 0.4.6). Es nahmen insgesamt mehr als 40 Verbundmitglieder vor Ort und online teil. Das erste Training für die CDRmare Nachwuchswissenschaftler*innen wurde zusammen mit der Jahresversammlung im März in Lüneburg durchgeführt. Das dritte RETAKE Jahrestreffen wurde am 04. - 05. Oktober 2023 in Wedel (Hamburg) durchgeführt. Mehr als 40 Verbundmitglieder haben an der hybriden Veranstaltung vor Ort oder online teilgenommen. Kerninhalt war der intensive Austausch über den aktuellen Forschungsstand der einzelnen Arbeitspakete sowie die Vernetzung mit Wissenschaftler*innen verwandter Forschungsprojekte (Schwerpunkt Ozean-Alkalinisierung). Neben dem aktuellen Stand des Arbeitsfortschritts im Verbundprojekt wurden hier auch weitere internationale Projekte und deren Forschungsstand vorgestellt. Neben Formaten wie *Break-out Groups* und *Round Table Discussions* zur zielgerichteten Diskussion spezifischer Schwerpunkte, wurden auch die notwendigen Vorbereitungen für Phase II des Verbunds diskutiert.

Es erfolgte wie geplant die Einrichtung der internen Kommunikationsplattform Confluence, inkl. eines eigenen Bereichs für RETAKE. Hier sind alle verbundrelevanten Informationen eingestellt, diese wurden laufend aktualisiert. Alle Verbundmitglieder hatten Zugang zu Confluence. Zusätzlich wurde die zweisprachige öffentliche RETAKE Webseite eingerichtet, auf der die Ziele des Verbundes sowie die Mitglieder vorgestellt werden: <https://retake.cdrmare.de>.

Es etablierte sich die Durchführung eines monatlichen RETAKE Jour Fixe, zu dem alle Verbundmitglieder sowie assoziierte Partner eingeladen waren und vom Verbundmanagement organisiert wurde. Die regelmäßigen online-Treffen ermöglichten den kontinuierlichen Austausch zwischen den einzelnen Arbeitspaketen, neben Updates zum Arbeitsfortschritt wurden in diesem Rahmen sich abzeichnende Probleme bereits frühzeitig diskutiert und generelle Fragen besprochen. Die Treffen des RETAKE

Lenkungsausschusses wurden nach Bedarf geplant und in digitaler Form ausgeführt. RETAKE AP1.4 war bei verschiedenen öffentlichen Veranstaltungen vertreten, so z.B. beim gut besuchten Tag der Offenen Tür am GEOMAR (21.08.2022) oder dem GEOMAR Science Day (15.09.2022). Die Verbundmanagerin unterstützte bei der Organisation des RETAKE-Beitrags (z.B. Postererstellung).

Das Verbundmanagement war im kontinuierlichen (wöchentlichen) Austausch mit der CDRmare Managerin, der CDRmare PR-Verantwortlichen sowie den Projektmanager*innen der anderen fünf Verbünde und sorgte aktiv für den notwendigen Informationsfluss. Bei Presseanfragen war das Verbundmanagement erste Kontaktstelle und koordinierte die Anfragen zur zielgerichteten Bearbeitung weiter. Die Webseite sowie der RETAKE-interne Bereich auf Confluence wurden fortwährend aktualisiert. Der Verbundmanager stand zudem in regelmäßigem Austausch mit den RETAKE Nachwuchswissenschaftler*innen.

AP0.5: RETAKE Transfer

Durch das Einbringen von Substanzen in die Wassersäule ist AE eine Methode, die von verschiedenen Interessensgruppen kontrovers diskutiert wird. Die Hauptaufgabe des RETAKE Transfers ist, die in RETAKE erarbeitete Bewertung auch für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger nutzbar zu machen. Dafür wurden verschiedene Interessensgruppen als Berater eingebunden und umfassend über Forschungsinhalte und -ergebnisse informiert.

Dafür waren u.a. thematische Stakeholder Workshops u.a. mit Vertretern der Zement- und Schifffahrtsindustrie und Experten der anderen Verbünde mit Fischereiexperten geplant. Der Workshop mit Industriebeteiligung, der ursprünglich im Herbst 2021 als Präsenzveranstaltung stattfinden sollte, konnte aufgrund der Covid-19 Pandemie nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus konnte die Stelle des RETAKE Transfermanagements erst sieben Monate nach Projektstart erfolgreich besetzt werden, wodurch sich der Aufbau des RETAKE Stakeholder-Beirats verzögerte.

Um die Verzögerung auszugleichen, den Kontaktaufbau und die Zusammenarbeit von RETAKE mit der Wirtschaft und den Wirtschaftsverbänden zu stärken und insgesamt den Technologietransfer in RETAKE und die Zusammenarbeit des Forschungsverbunds mit der Wirtschaft und Wirtschaftsverbänden zu stärken, wurde der Transfer durch ein norddeutsches Technologietransferunternehmen (Kieler Wissenschaftszentrum, kurz: WiZe) ab Juni 2022 unterstützt, da hier wichtige Kontakte in die Industrie und Wirtschaft insbesondere in den Kieler Raum bereits bestanden. Durch Arbeitsunfähigkeit, Wiedereingliederung und Personalwechsel am WiZe konnte der Aufbau des Stakeholder-Beirats jedoch erst im Frühjahr 2023 aufgenommen werden. Auch der erste Workshop mit Industriebeteiligung konnte aufgrund dieser Entwicklungen nicht in 2022 durchgeführt werden.

Der Workshop Fischerei-Szenarien fand am 06.09.2022 im Maritim Hotel Kiel statt. 14 Expert*innen aus der marinen Biogeochemie, Ökonomie und Fischereibiologie trafen sich, um drei Szenarien zu entwickeln, die die künftige Erhöhung der Alkalinität und deren Auswirkungen auf die Fischerei weltweit berücksichtigten. Für ein Fischereimodell, das die globalen Auswirkungen aufzeigte, wurden die Narrative definiert und zusätzliche Modellparameter (z. B. Fischereikosten, Tragfähigkeit, Managementeffektivität) für jedes Szenario festgelegt, wobei zwischen Entwicklungs-, Industrie- und Schwellenländern unterschieden wurde. Die Ergebnisse des Workshops mündeten in eine gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung (Grünhagen et al., 2023). Im Nachgang zum ersten Workshop Fischerei-Szenarien wurde nach einem intensiven Diskurs entschieden, die Forschungsergebnisse in Form von Visualisierungen verfügbar zu machen. Zugunsten dieses Kommunikationsformats wurde der zweite Workshop Fischerei-Szenarien im Folgejahr 2023 ersetzt. Der regelmäßige Austausch mit den Teilnehmenden des 1. Workshops wurde dezentral fortgeführt. Das neue Kommunikationsformat verspricht im Vergleich zu einem zweiten Workshop eine signifikante Steigerung der Reichweite und ermöglicht eine direkte Kommunikation an die breitere Öffentlichkeit.

Das RETAKE Stakeholder Panel wurde ab April 2023 mit Stakeholdern aus der Wirtschaft neu initiiert. Diese Stakeholder wurden zum ersten Workshop mit Industriebeteiligung am 16. November 2023 eingeladen. Die 25 Teilnehmer*innen (geladen 36) des RETAKE Synergy Summit 2023 - connecting science and industry for OAE application setzten sich sowohl aus Wissenschaftler*innen des Verbunds (Natur- und Rechtswissenschaften) wie auch regionalen, nationalen und internationalen Wirtschaftsunternehmen zusammen (Gesteinsproduktion, Transport, Reaktoren- und Sensorentwicklung, Wasseraufbereitungs- und Kraftwerksbetreiber, etc.). Der Workshop diente der Netzbildung, der Vermittlung des aktuellen Forschungsstandes an die nichtwissenschaftlichen Teilnehmer*innen sowie der gemeinsamen Erarbeitung erster Ideen / Ansätze für eine wissenschaftlich begleitete Pilotierung von Alkalinisierung durch Wirtschaftsunternehmen im norddeutschen Raum.

Das RETAKE Transfermanagement nahm an unterschiedlichen Veranstaltungen als RETAKE Vertretung teil, u.a. an der Auftaktveranstaltung des Deutschen Verbands für Negative Emissionen in Berlin, um das Netzwerk zu Wirtschaftspartnern weiter zu expandieren. Im Rahmen der Veranstaltung Wissenschaftspolitische Diskussion mit CDRmare und OceanNETs in Brüssel wurde bereits in 2022 gemeinsam mit Wissenschaftler*innen des EU-Projekts OceanNets das wissenschaftliche Policy Brief *Achieving Climate Neutrality and Paris Agreement Goals: Opportunities for Ocean-Based Methods of Carbon Dioxide Removal* entwickelt und veröffentlicht: (https://cdrmare.de/wp-content/uploads/2022/10/CDRmareOceanNETs_policybrief_final.pdf).

Aufgrund der Kooperation mit dem Projekt OceanNets konnte eine große EU-weite Reichweite erzielt werden. Neben weiteren mCDR-Maßnahmen liegt ein starker Fokus des Policy Briefs auf der in RETAKE erforschten Methode zur Alkalisierung des Ozeans. Das Policy Brief wurde in 2023 in zahlreichen Dialog-Formaten des CDRmare und RETAKE Transfers genutzt.

Das RETAKE Transfermanagement stand in engem Austausch mit dem übergeordneten CDRmare und ASMASYS Transfermanagement. Darüber hinaus bestand ein enger Austausch mit den Transfermanagern der einzelnen Verbände, der durch regelmäßige Treffen gewährleistet wurde.

AP1.2: Alkalinisierung der Wassersäule

In Kulturexperimenten wurde die im Ozean dominante Kalkalge *Emiliana huxleyi* unterschiedlichen Alkalinitätserhöhungen ausgesetzt und Wachstumsrate und Kalkbildungsrate bestimmt. Bei einer Veränderung der Gesamtalkalinität (ΔTA) von etwa $600 \mu\text{mol kg}^{-1}$ und mit abnehmenden CO_2 -Konzentrationen, nahm die Wachstumsrate von *E. huxleyi* ab. Dies deutet auf eine Schwellenkonzentration von etwa $100 \mu\text{atm CO}_2$ hin, die für optimales Wachstum erforderlich ist. Das Verhältnis von zellulärem Kalzit zu organischem Kohlenstoff (PIC:POC) blieb über den gesamten Bereich der Gesamtalkalinität stabil. Die Ergebnisse zeigten keine Zunahme der Kalkbildungsrate unter erhöhter Alkalinität. Die mit der Alkalinisierung einhergehende Verminderung des CO_2 Konzentration führte stattdessen zu verminderten Wachstumsraten und im Zuge dessen auch zu verminderter Kalkbildung (Abb. 2). Da bekannt ist, dass die Bildung der Kokosphäre bei *E. huxleyi* eng mit dem Wachstum der einzelnen Zelle zusammenhängt, vermuten wir, dass die beobachtete Reduktion der PIC-Produktion in unseren Daten durch die verringerte Wachstumsrate unter CO_2 -limitierten Bedingungen erklärt werden kann. Die „white ocean hypothesis“ wird durch die hier erzielten Ergebnisse, zumindest für Kalkalge *Emiliana huxleyi*, nicht unterstützt.

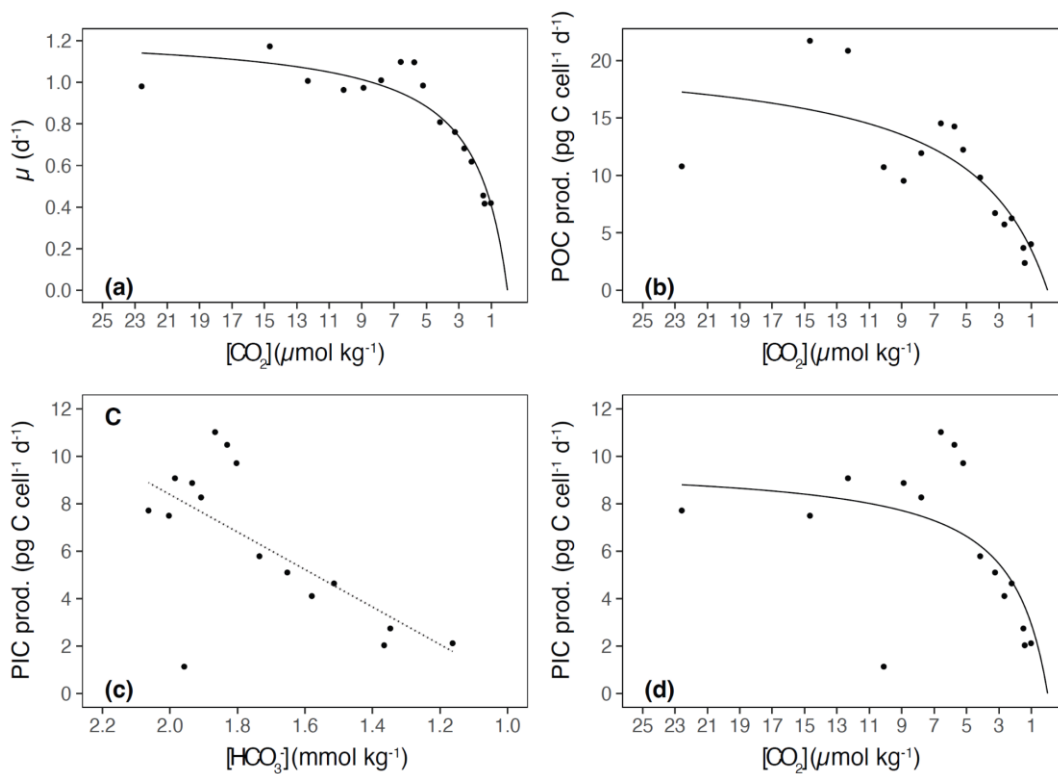


Abb. 2: Wachstumsraten, zelluläre POC- und PIC-Produktion in Abhängigkeit von $[\text{CO}_2]$ und $[\text{HCO}_3^-]$. (a) Wachstumsrate (μ) in Abhängigkeit von $[\text{CO}_2]$. Die durchgehende Linie stellt die Michaelis-Menten-Anpassung in der Form $V = V_{\text{max}} \cdot f\text{CO}_2 / (K_{\text{m}} + f\text{CO}_2)$ dar, wobei V das Wachstum bei einem spezifischen $f\text{CO}_2$ ist, V_{max} das theoretische Maximum des Wachstums oder der Produktion, K_{m} das $f\text{CO}_2$, bei dem das Maximum halbgesättigt ist ($R^2 = 0.87$, $p < 0.0001$). (b) POC-Produktion (POC prod.) in Abhängigkeit von $[\text{CO}_2]$. Die Michaelis-Menten-Anpassung (in diesem Fall ist V die POC-Produktion bei einem spezifischen $f\text{CO}_2$, V_{max} das theoretische Maximum der Produktion, K_{m} das $f\text{CO}_2$, bei dem das Maximum halbgesättigt ist; $R^2 = 0.65$, $p < 0.05$). (c) PIC-Produktion (PIC prod.) in Abhängigkeit von $[\text{HCO}_3^-]$. Die Anpassung gemäß der linearen Regression wird angegeben ($R^2 = 0.40$, $p < 0.01$). (d) PIC-Produktion (PIC prod.) in Abhängigkeit von $[\text{CO}_2]$. Die Michaelis-Menten-Anpassung (in diesem Fall ist V die PIC-Produktion bei einem spezifischen $f\text{CO}_2$, V_{max} das theoretische Maximum der Produktion bei, K_{m} das $f\text{CO}_2$, bei dem das Maximum halbgesättigt ist; $R^2 = 0.40$, $p = 0.12$). Die biologischen Reaktionsdaten werden gegenüber den Mittelwerten der anfänglichen und endgültigen $[\text{CO}_2]$ und $[\text{HCO}_3^-]$ Werte dargestellt.

Die Diatomee *Thalassiosira weissflogii* sowie die Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* und der Dinoflagellat *Amphidinium carterae* wurden auf ihre Sensitivität hinsichtlich erhöhten Nickel-Konzentrationen untersucht (Abb. 3 & Abb. 4 & Abb. 5). Hierfür wurden die drei Arten Ni-Konzentrationen im Bereich von 0 bis $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ ausgesetzt, jeweils unter Zugabe von $12 \mu\text{mol L}^{-1}$ synthetischen Liganden (EDTA). Signifikant verminderte Wachstumsraten traten, je nach Art, bei Ni-Konzentrationen von 8-20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ auf. Die Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* zeigte dabei die höchste Toleranz gegenüber Nickel, mit der geringsten Hemmung der Wachstumsrate und der höchsten Biomasseproduktion. Mit einer Alkalinisierung mittels Olivin um $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ würde ein Anstieg der Ni-Konzentration um schätzungsweise $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ einhergehen, bei einer Verdoppelung der Alkalinität des Meerwassers würde die Ni-Konzentration um etwa $70 \mu\text{mol L}^{-1}$ steigen. Die hier ermittelten Toxizitätsgrenzwerte liegen also in Bereichen, die bei einer Olivin-basierten Alkalinisierung an der Punktquelle auftreten könnten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass bei geringeren Liganden-Konzentrationen unter natürlichen Bedingungen die Nickelsensitivität erhöht sein dürfte.

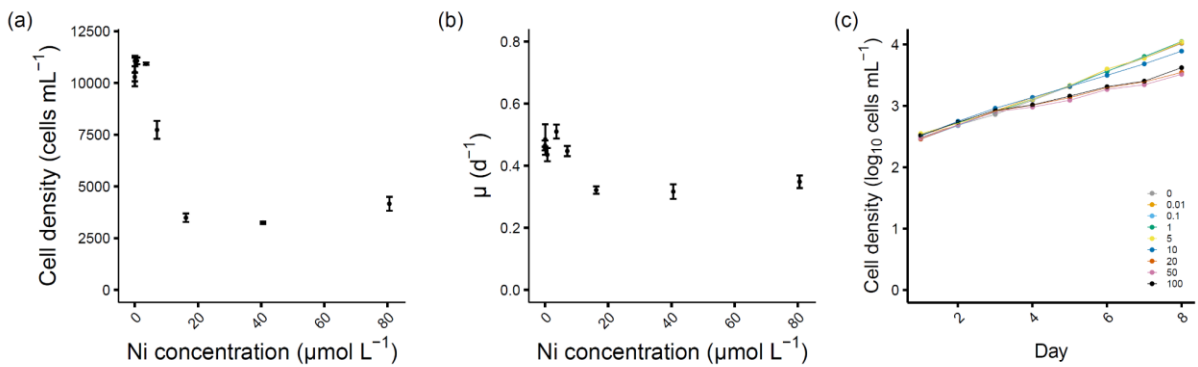


Abb. 3: Wachstumsrate von *A. carterae*. (a) Zelldichte (Zellen mL⁻¹) und (b) Wachstumsrate (d⁻¹) in Abhängigkeit von den gemessenen Ni-Konzentrationen am letzten Versuchstag. (c) Log-transformierte Zelldichte in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) um den Zeitpunkt der Reaktion zu verdeutlichen; Ziel-Ni-Konzentrationen (μmol L⁻¹) dienen der Übersicht. Fehlerbalken geben die Standardabweichung (N = 3) an. Sind diese nicht sichtbar, sind die Fehlerbalken kleiner als die Symbole.

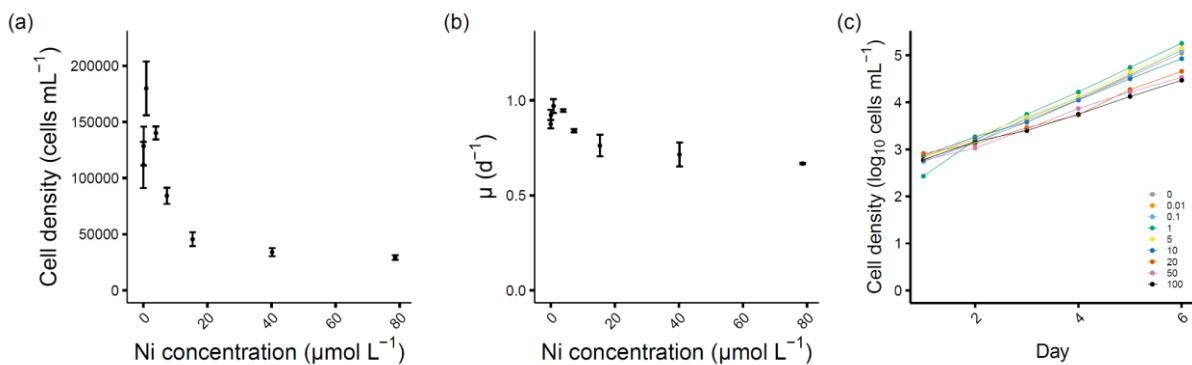


Abb. 4: Wachstumsrate von *E. huxleyi*. (a) Zelldichte (Zellen mL⁻¹) und (b) Wachstumsrate (d⁻¹) in Abhängigkeit von den gemessenen Ni-Konzentrationen am letzten Versuchstag. (c) Log-transformierte Zelldichte in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) um den Zeitpunkt der Reaktion zu verdeutlichen; Ziel-Ni-Konzentrationen (μmol L⁻¹) dienen der Übersicht. Fehlerbalken geben die Standardabweichung (N = 3) an. Der Datenpunkt bei 0.01 μmol L⁻¹ wurde in (a) und (b) auf Grund eines technischen Messfehlers entfernt. Sind sie nicht sichtbar, sind die Fehlerbalken kleiner als die Symbole.

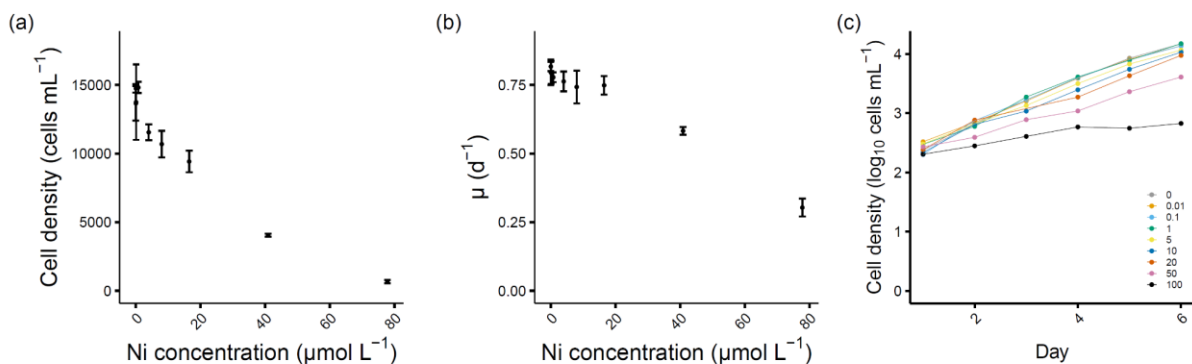


Abb. 5: Wachstumsrate von *T. weissflogii*. (a) Zelldichte (Zellen mL⁻¹) und (b) Wachstumsrate (d⁻¹) in Abhängigkeit von den gemessenen Ni-Konzentrationen am letzten Versuchstag. (c) Log-transformierte Zelldichte in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) um den Zeitpunkt der Reaktion zu verdeutlichen; Ziel-Ni-Konzentrationen (μmol L⁻¹) dienen der Übersicht. Fehlerbalken geben die Standardabweichung (N = 3) an. Sind diese nicht sichtbar, sind die Fehlerbalken kleiner als die Symbole.

Es wurde weiterhin untersucht in wie fern zwei Ansätze zur Erhöhung der Alkalinität, CO₂-äquilibrierte und nicht-äquilibrierte Alkalinisierung, Änderungen in den Konkurrenzbeziehungen innerhalb des Phytoplanktons in Abhängigkeit

von der Alkalinitätserhöhung auslösen. Während CO_2 -äquilibriumierte Alkalinisierung relativ moderate Änderungen im pH Wert und der Karbonatsättigung bei unverändertem $[\text{CO}_{2(\text{aq})}]$ erzeugt, führt die nicht-äquilibriumierte Alkalinisierung zu starken Änderungen im pH, $[\text{CO}_{2(\text{aq})}]$ und der Karbonatsättigung. Für die Experimente wurde natürliches Seewasser durch eine Gaze mit 56 μm Maschenweite filtriert, um Mikro- und Mesozooplankton abzutrennen. Anschließend wurde das Wasser in 250-ml-Flaschen umgefüllt. Die Experimente (sowohl CO_2 -äquilibriumierte, als auch nicht-äquilibriumierte) folgten einem Gradientenplan: Die Alkalinität wurde in den verschiedenen Flaschen in Schritten von 200 $\mu\text{Eq/L}$ zugegeben, von 0 bis ΔTA 2800 $\mu\text{Eq/L}$. Dadurch ergaben sich insgesamt 15 Treatments für jeden Versuch. Die Flaschen wurden in einem Inkubator mit einem kontinuierlichen Wasserfluss platziert, um in situ Temperatur zu gewährleisten und mit blauer Folie abgedeckt, um die Lichtintensität in 10 m Wassertiefe zu simulieren. Die Versuche dauerten 6 Tage, und die Messungen wurden alle zwei Tage durchgeführt. Die Messparameter umfassten neben der Karbonatchemie (TA und DIC) die Zellzahl und Artenzusammensetzung mittels Durchflusszytometrie sowie die photosynthetische Effizienz mittels Fluorometrie (FastOcean Fast Repetition Rate Fluorometer). Die CO_2 -äquilibriumierte Alkalinitätserhöhung führte zu keinen detektierbaren Änderungen der Stoffwechselprozesse sowie der Artenzusammensetzung über den kompletten ΔTA Gradienten. Die Daten belegten, dass sich die Phytoplanktongemeinschaft bei allen getesteten Alkalinitätswerten in gleicher Weise entwickelte (Abb. 5b) und dass die Algen photophysologisch keinem Stress ausgesetzt waren. Im nicht-äquilibriumierten Ansatz zeigte die Phytoplanktongemeinschaft nach zwei Tagen einen starken Rückgang der Zellzahl ab einer Alkalinitätserhöhung von 1800 $\mu\text{Eq/L}$. Der Rückgang der Zellzahlen betrifft alle mit dem Durchflusszytometer identifizierten Phytoplanktongruppen. In ähnlicher Weise zeigen die Werte der photosynthetischen Effizienz einen starken Rückgang ab einer Alkalinitätserhöhung von 1600 $\mu\text{Eq/L}$ (Abb. 5a). Die statistischen Analysen ergaben, dass ein erhöhter pH-Wert und ein niedriger $[\text{CO}_{2(\text{aq})}]$ die Schwankungen in der Phytoplankton-Gemeinschaft erklären können, wobei der pH-Wert die stärkere Korrelation ergibt. Der nicht-äquilibriumierte Ansatz zeigt, dass der Schwellenwert, oberhalb dessen die Phytoplanktongemeinschaft stark negativ beeinflusst wird, bei pH 9,6, bzw. einem Gesamt-TA Wert von 3800 $\mu\text{Eq/L}^{-1}$ liegt.

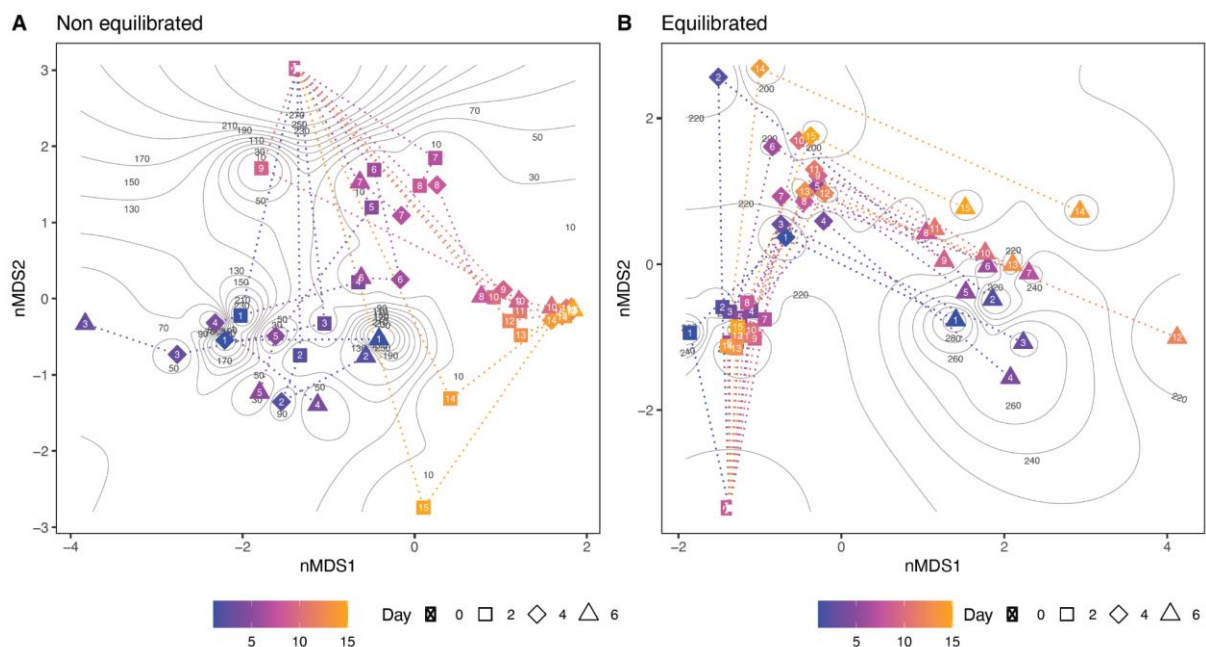


Abb. 6: nMDS-Analysen von nicht-äquilibriumierten (a) und CO_2 -äquilibriumierten (b) Ansätzen; die Methode berechnet eine Unähnlichkeitsmatrix der ökologischen Gemeinschaften anhand von Abundanzdaten und stellt sie mit einer reduzierten Anzahl von Dimensionen dar. In dieser Studie umfasst die Datenmatrix die Abundanzdaten für jede Phytoplanktongruppe in jeder Flasche für jeden Messtag.

In dem abschließenden pelagischen Mesokosmen-Experiment zu ökologischen und biogeochemischen Auswirkungen von Ozean-Alkalinisierung, wurden zwölf jeweils 6000 Liter fassende Mesokosmen im Südhafen von Helgoland ausgebracht und mit Wasser von außerhalb des Hafens – und allen zu dieser

Jahreszeit im Plankton vorkommenden Organismen – mittels einer peristaltischen Pumpe befüllt (Abb. 7a). In dieser Studie wurde eine nicht-equilibrierte, auf Kalzium basierte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Alkalinisierung simuliert. Dazu wurde ein ΔTA -Gradient von 0 bis $1250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ in Schritten von $250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ angelegt (Abb. 7b).

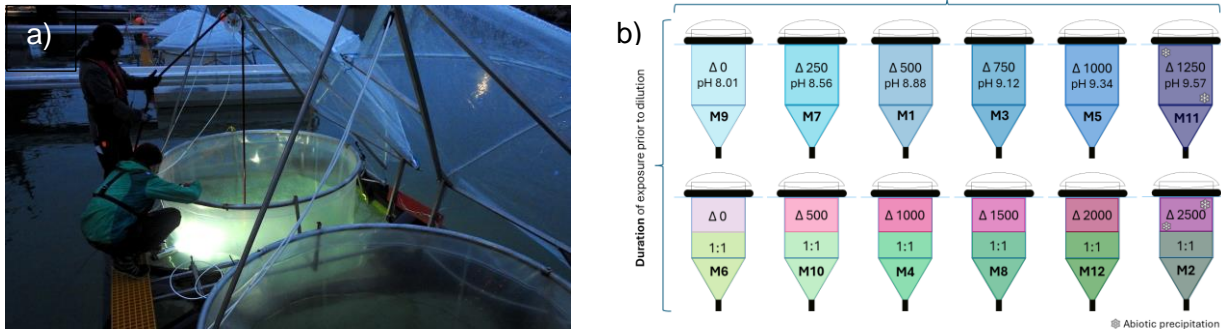


Abb. 7: a) Ansicht des Aufbaus des Mesokosmen-Experimentes an der Pier im Helgoländer Südhafen, b) Experimentelles Design des pelagischen Mesokosmen-Experimentes mit den verschiedenen Alkalinitäts-Intensitäten und Durchmischungs-Zeitpunkten.

Zusätzlich wurden Szenarien mit sofortiger und verzögerter Verdünnung verglichen, wobei jedes Szenario nach dem Durchmischen mit dem gleichen ΔTA -Gradienten endete. Diese Szenarien sollen unterschiedliche Ausbringungsansätze simulieren – sofortige Verdünnung, z.B. einer schiffsbasierten Ausbringung, verzögerte Verdünnung, z.B. einer land-basierten Ausbringung in Gewässern mit beschränkter Durchmischung. Die beiden Schichten bei der verzögerten Verdünnung wurden mittels Zugabe einer geringen Menge Süßwasser in der obersten Schicht zusammen mit der Erhöhung der Alkalinität hergestellt. Die gleiche Süßwasserzugabe wurde bei der sofortigen Verdünnungsbehandlung vorgenommen, wobei sie in diesem Fall über die gesamte Wassersäule verteilt wurde. Mehr als 45 physikalische, chemische und biologische Parameter wurden während des 39-tägigen Experiments überwacht (Abb. 8).

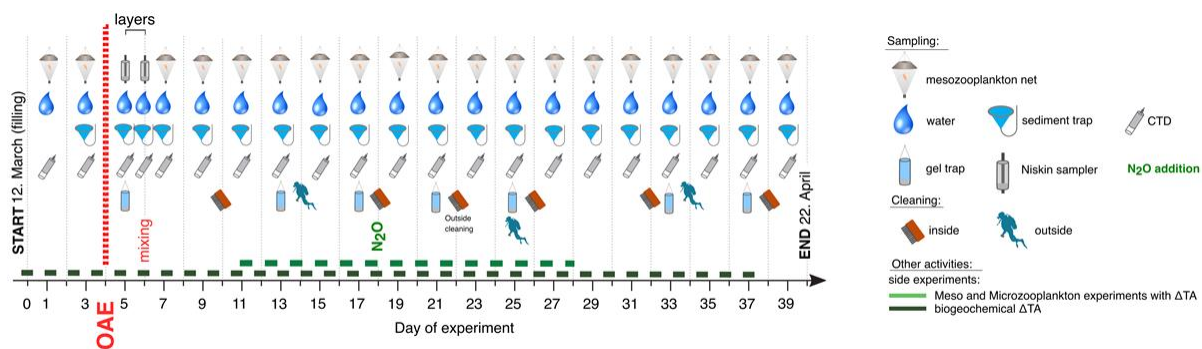


Abb. 8: Übersicht über den zeitlichen Ablauf des Mesokosmen-Experimentes auf Helgoland. Die rot gestrichelte Linie "OAE" steht für die Alkalinitäts-Manipulation sowie die Schichtung der Mesokosmen zur späteren Durchmischung "mixing".

Zu unserer Überraschung wurden selbst bei der niedrigsten ΔTA -Konzentration von $250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ signifikante Auswirkungen festgestellt, sowohl bei sofortiger als auch bei verzögerter Verdünnung. Es zeigten sich geringere Chlorophyll-a Konzentrationen während des Experimentes bei Alkalinitätsunterschieden ab $500 \mu\text{mol kg}^{-1}$ sowie verspätete Phytoplankton-Blüten unter hohen Alkalinitäten, unabhängig von der Art der Durchmischung (Abb. 9).

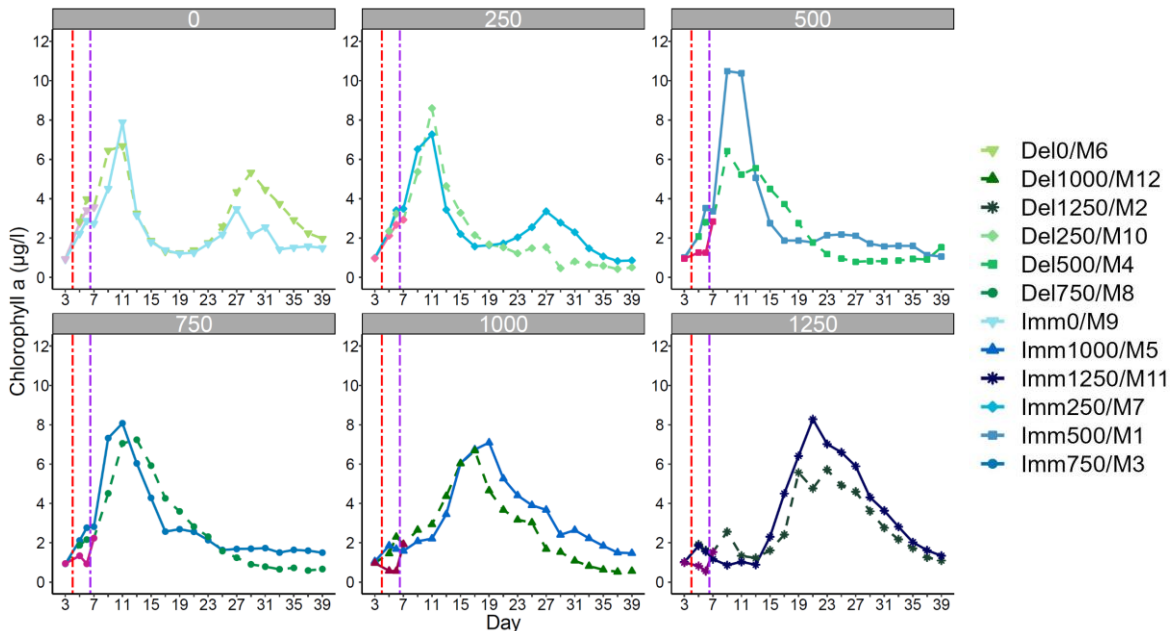


Abb. 9: Entwicklung der Chlorophyll-Konzentrationen [µg/l] im Laufe der Mesokosmen-Studie, zum direkten Vergleich unterteilt in jeweils die beiden Durchmischungs-Szenarien pro Alkalinitätskonzentration.

AP1.4: Verstärkte benthische Verwitterung von Karbonat und Olivin in der Ostsee

Ziel des AP1.4 war es verstärkte benthische Verwitterung (EBW) von alkalischen Mineralien, die dem Meeresboden der Ostsee künstlich zugeführt werden, im Hinblick auf ihre Wirksamkeit als CDR-Strategie sowie ihre Umweltauswirkungen zu untersuchen. Vor RETAKE I gab es erhebliche Wissenslücken hinsichtlich der Reaktivität alkalischer Minerale unter natürlichen Bedingungen. Auch waren die Auswirkungen der Mineralzugabe auf die Biologie und die damit einhergehenden Änderungen der biogeochemischen Stoffkreisläufe im Sediment unbekannt. Durch eine Reihe von Laborexperimenten, Benthokosmenstudien und numerischen Modellierungen konzentrierte sich AP1.4 auf die Auflösung von zwei Mineralien: Kalziumkarbonat (Kalzit) und ein mafisches Silikatmineral (Olivin, in Form olvinreichen Duniten). Beide werden derzeit als potenzielle Kandidaten für großtechnische Anwendungen von OAE angesehen. Die Ergebnisse der AP1.4 Arbeiten wurden in mehreren begutachteten Manuskripten veröffentlicht (Fuhr et al., 2022, 2023, 2024a, 2024b, Dale et al., 2024; Eisamann et al., 2023; Riebesell et al., 2023) und erreichen somit alle in der ursprünglichen Projektbeschreibung genannten Meilensteine. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse ausführlicher dargestellt.

Das Untersuchungsgebiet war Boknis Eck (28 m Wassertiefe) - ein saisonal anoxisches Becken in der Eckernförder Bucht (Kieler Bucht). Sedimentkerne wurden hier entnommen und in einem temperaturgeregelten Labor errichtet (Abb. 10A). Alkalisches Gesteinspulver (Dunit oder Kalzit) wurde auf die Sedimentoberflächen gegeben und die Sedimentkerne wurden maximal für drei Monate inkubiert. Die Kerne wurden regelmäßig beprobt, um die chemische Zusammensetzung des Bodenwassers (BW) sowie des Porenwassers als auch die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften der Sedimente zu ermitteln.

Es wurden zwei Sedimentkernexperimente durchgeführt: das erste war mit oxischem BW und das zweite mit hypoxischem/anoxischem BW überschichtet (Abb. 10A) (Fuhr et al., 2023; 2024). Damit sollten die saisonal schwankenden Sauerstoffkonzentrationen in Boknis Eck nachgebildet werden. Die Ergebnisse der Inkubationsstudien lieferten ein erstes Verständnis der Mineralauflösung in Sedimenten. Sie basierten auf Vorversuchen mit Olivinen, die zeigten, dass die Ausfällung von Sekundärmineralien (z.B. Karbonat) den Alkalinitätsgewinn durch die Olivinauflösung verringern kann (Fuhr et al., 2022). Neben den Sedimentkerninkubationen wurde ein dritter Versuchstyp genutzt: Sediment-befüllte Benthokosmen die

Kalzit- und Dunitauflösung unter möglichst natürlichen Bedingungen entlang eines Jahreszyklus untersuchten (Abb. 10B). Dies wurde anhand der sich ändernden Temperatur, Sauerstoffgehalts und Zufuhr organischen Materials in das BW nachgebildet. Die Benthokosmen wurden regelmäßig beprobt, um die Alkalinitätsfreisetzung aus dem Sediment sowie die Geochemie und die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft im Sediment zu untersuchen.

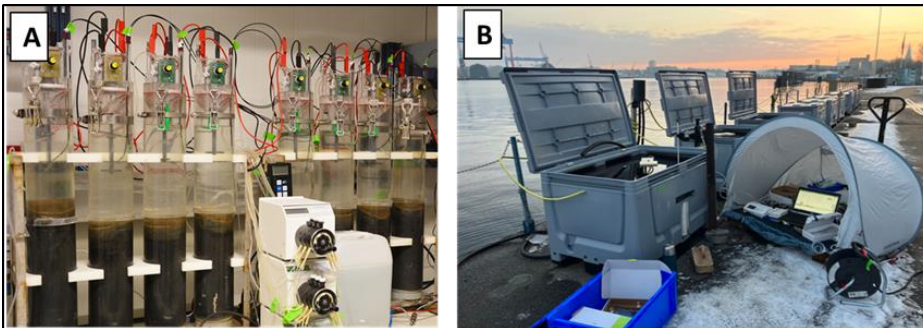


Abb. 10. In RETAKE durchgeführte Versuchsaufbauten: (A) Sedimentkerne mit Bodenwasser. (B) Benthokosmen mit kontinuierlichem Durchstrom von Meerwasser aus der Kieler Förde. In Triplikaten blieben die Sedimentoberflächen (i) unbehandelt (Kontrolle) oder wurden mit (ii) Kalzit oder (iii) Dunit versetzt.

Die wichtigsten Erkenntnisse, die sich sowohl aus den Laborinkubationen als auch aus den Benthokosmenexperimenten ergaben, war eine erheblich effizientere und schnellere Auflösung von Kalzit im Vergleich zu Dunit in der Ostsee (Abb. 11A). Dies war recht überraschend, da sich laufende und veröffentlichte Studien über EBW auf olivin-reiche Gesteine konzentriert haben. Der wahrscheinliche Grund für diese Diskrepanzen ist, dass BW und Sedimente in der Regel in Bezug auf Dunit untersättigt sind (d. h. die Auflösung wird begünstigt), während Meerwasser in Bezug auf Kalzit im Allgemeinen übersättigt ist (d. h. die Auflösung wird limitiert).

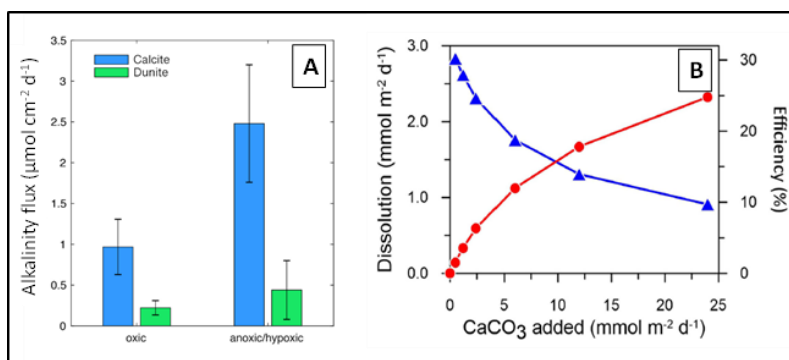


Abb. 11: (A) Vergleich der erhöhten Alkalinitätsflüsse für Sedimentkerne die mit Kalzit (blau) und Dunit (grün) behandelt und mit oxischem bzw anoxischen/hypoxischen BW überschichtet waren (Fuhr et al., 2023; 2024). (B) Modellergebnisse der Kalzitauflösungsrate (rote Kurve) und der Auflösungseffizienz (blaue Kurve) von Boknis Eck Sedimenten in Abhängigkeit der Menge des zugeführten Kalzits (Dale et al., 2024).

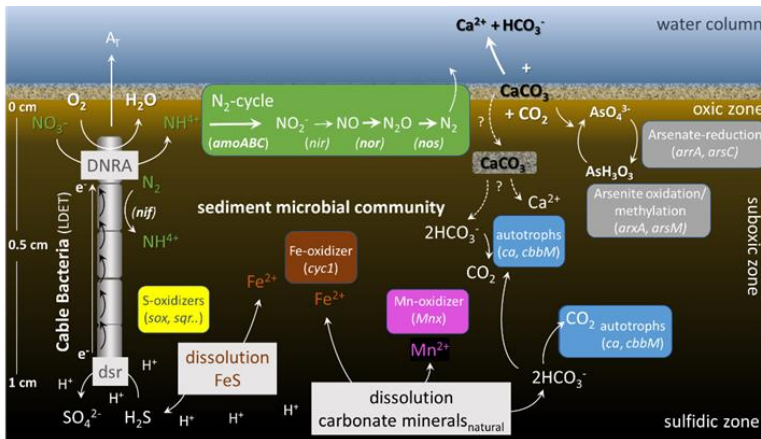


Abb. 12: Schema möglicher Änderungen des biogeochemischen Stoffkreislaufs in Sedimenten, zu denen Kalzit hinzugefügt wurde (mit sauerstoffarmen Bodenwasser). Der mutmaßliche biogeochemische Stoffkreislauf wurde aus dem Transkriptom-Datensatz extrahiert (Abb. entnommen aus Bährle et al. eingereicht Dez 2024). LDET= long distance electron transfer.

In den oxischen Experimenten war das BW im Hinblick auf Kalzitauflösung übersättigt. In diesem Fall fand die Kalzitauflösung unterhalb der Sedimentoberfläche statt, wo der pH-Wert des Porenwassers durch den Abbau organischer Materie und mikrobieller Schwefelwasserstoff (H_2S)-Oxidation verringert wurde. Insbesondere die so genannten Kabelbakterien sind in der Lage den pH-Wert auf <6 abzusenken, indem sie H_2S Oxidation und Sauerstoffreduktion über zentimeterlange Distanzen mittels konduktiver Fasern räumlich koppeln (vgl. Abb. 12). Durch die aktive Versauerung des Porenwassers durch diese Mikroben ist das Potenzial zur Kalzitauflösung sehr hoch. Allerdings hängt der Grad der Versauerung auch weitgehend von der natürlichen Pufferkapazität der Sedimente, d. h. dem Karbonatgehalt, ab. In Oberflächensedimenten der oxischen Sedimentkerninkubationen schienen sich Kabelbakterien zufällig anzureichern, unabhängig davon, ob und welche Art von Mineralien der Oberfläche zugesetzt wurden (Fuhr et al., 2023). Im Gegensatz dazu wurden sie in den Kerninkubationen, in denen sauerstoffarme Bedingungen im BW simuliert wurden, offenbar durch die Zugabe von Kalzit stimuliert (Bährle et al. eingereicht Dez. 2024). Transkriptomdaten aus den Sedimentkern-Inkubationen unter sauerstoffarmen Bedingungen lieferten auch erste Hinweise darauf, wie sich der mikrobiell vermittelte Stoffkreislauf nach Kalzitzugabe verändern kann (Abb. 12) (Bährle et al. eingereicht Dez. 2024).

Noch höhere Raten der Kalzitauflösung wurden während der Anoxie/Hypoxie im BW der entsprechenden Experimente beobachtet, die mit Sedimenten durchgeführt wurden, die unmittelbar nach der Anoxie-Phase in Boknis Eck gesammelt wurden (Abb. 11a). Aufgrund der Sauerstofflimitierung ist Bioturbation durch Makrofauna zu diesem Zeitpunkt vernachlässigbar. Außerdem wird das BW durch die Schichtung der Wassersäule im Sommer in Bezug auf Kalzit untersättigt. Das hinzugefügte Kalzit löst sich dann an der Sedimentoberfläche mit einer Geschwindigkeit auf, die mehr als doppelt so hoch ist wie unter oxischen BW Bedingungen. Auf der Grundlage der gesammelten Daten wurden in-situ kinetische Konstanten für die Karbonat- und Olivinauflösung unter diesen anoxischen Bedingungen als Funktion der saisonalen biogeochemischen Bodenwasserchemie berechnet, die sehr gut mit den bereits in der Literatur veröffentlichten Konstanten übereinstimmen (Fuhr et al., 2023).

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den beiden Sedimentkerninkubationen wurde ein numerisches biogeochemisches Modell entwickelt, um diese Dynamik für die langfristige Kalzitauflösung in den Boknis Eck Sedimenten zu verstehen (Dale et al., 2024). Das Modell deutet darauf hin, dass die Effizienz der Kalzitauflösung gering ist und der größte Teil des Kalzits bei moderater Zugabe ohne Auflösung vergraben wird (Abb. 11b). Die Anwendung des Modells auf andere Standorte in der Ostsee zeigt, dass die

Auflösungsraten und -effizienzen in Gebieten mit niedrigem Salzgehalt und untersättigtem BW, wie z. B. in der nordöstlichen Ostsee, noch höher sind.

Die Ergebnisse der Langzeit-Benthokosmenexperimente zeigten, dass die beobachteten Auflösungsraten für Kalzit die für den Grad der Untersättigung in Bezug auf Kalzit im Porenwasser modellierten Werte überstiegen. Stattdessen korrelierte die Auflösung sowohl von Dunit als auch von Kalzit mit der Temperatur und waren in Phasen mit sauerstoffreichem BW am stärksten ausgeprägt. Dies deutet auf einen starken Einfluss der Makrofauna hin, die die Auflösung von Kalzit und Dunit über das Maß hinaus fördert, als das allein aufgrund der Porenwasserchemie zu erwarten wäre. Der dazugehörige mikrobielle Datensatz wird derzeit finalisiert.

Auf der Grundlage der neuen Parametrisierung der Auflösungskinetik wurde ein Boxmodell der Kieler Bucht erstellt, um die potenzielle CO₂-Entnahme nach Zugabe von Kalzit in Boknis Eck zu simulieren (Fuhr et al., 2024b). Die Modellergebnisse zeigen, dass bei einer Zugabe von 2500 Tonnen Kalzit, verteilt auf eine Anwendungsfläche von 25 km², bis zu 1000 Tonnen CO₂ pro Jahr gebunden werden können. Eine höhere Gesamtaufnahme wäre nur um den Preis einer geringeren Effizienz zu erreichen. Erste Berechnungen zeigen, dass EBW-Kosten von 70 € - 400 € pro Tonne CO₂ verursachen würde. Bei einer maximalen Abscheidungsmenge von etwa 6000 Tonnen liegen die Preise zwischen 180 und 200 € pro Tonne CO₂. Damit wäre EBW wirtschaftlich mit anderen CDR-Verfahren vergleichbar. Die Ergebnisse aus der Ostsee könnten auch auf andere Gebiete des Weltozeans, z. B. Auftriebsgebiete, übertragen werden.

Auf der Grundlage der bisherigen Ergebnisse könnten die schlickigen Sedimente der Kieler Bucht geeignete Gebiete für EBW-Feldversuche in der Ostsee sein. Die genauen Auswirkungen auf das benthische Ökosystem müssen noch untersucht werden, um eine Risikobewertung für EBW als Klimaschutzstrategie zu definieren.

AP3.2: Globale Modellierung

Als wesentliches Ergebnis der Simulationen mit dem FOCl Modell konnte gezeigt werden, dass das Ausmaß der ozeanischen Kohlenstoffaufnahme durch Alkalinitätserhöhung von den künftigen Emissionen abhängt: Das Modell wurde dafür zunächst unter zwei Hintergrundklimazuständen des 21. Jahrhunderts ausgeführt - SSP1-2.6 (niedrige Emissionen) und SSP3-7.0 (hohe Emissionen). Die Erhöhung der Alkalinität an der europäischen Nordatlantikküste, die einer Zugabe von 1 Gt Ca(OH)₂ pro Jahr mit einer anfänglichen Anlaufzeit von 10 Jahren bis zum Ende des Jahrhunderts entspricht, führte zu einem Anstieg des Kohlenstoffinventars des globalen Ozeans um 14,2 PgC (SSP1-2.6) bzw. 17,8 PgC (SSP3-7.0). Dieses Ergebnis wurde inzwischen auch von anderen internationalen Modellierungsgruppen verifiziert (e.g. Schwinger et al., 2024, ERL, doi: [10.1088/1748-9326/ad5a27](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5a27)) und zeigt, dass die Kohlenstoffaufnahme durch die Erhöhung der Alkalinität des Ozeans nicht nur von der aktuellen Situation, sondern auch von den künftigen Emissionen abhängt.

Während die globale durch Alkalinitätserhöhung induzierte Kohlenstoffkreislauf des Ozeans sensitiv auf Änderungen der zukünftigen Emissionen reagiert, bleibt die regionale Verteilung der CO₂-Aufnahme für die betrachteten Emissionsszenarien praktisch unverändert. Im Fall des hier simulierten Alkalinitätseintrags entlang der europäischen Atlantikküste finden für hohe und niedrige zukünftige Emissionen jeweils 28% der CO₂-Aufnahme in der Ausbringungsregion statt. Dies könnte helfen, robuste Strategien für das Monitoring und die Verifizierung von möglichem CDR durch Alkalinitätserhöhung zu entwickeln.

Ein überraschendes Ergebnis der Arbeiten in AP3.2 war ein deutlicher Einfluss der Modellauflösung auf die simulierte Kohlenstoffaufnahme bei identischen Alkalinitätseintrag. Simulationen mit einem sogenannten Overshoot-Szenario (SSP5-3.4os) ergaben bei identischem Alkalinitätseintrag wie in den o.a. Simulationen eine Kohlenstoffaufnahme von 14,8 Pg in der grob aufgelösten Standardversion des Modells. Die Simulation mit dem eingekoppelten hoch aufgelösten (1/10 Grad) Nest ergab dagegen für identische Randbedingungen nur eine Aufnahme von 7,2 Pg. Leider konnten aufgrund der Änderungen der

Rechnerinfrastruktur seit Mitte 2023 keine weiteren Simulationen mit dem hochauflösten Nest durchgeführt werden, so dass die Signifikanz des Ergebnisses durch interne Variabilität der Modelllösungen nicht genau quantifiziert werden kann. Eine deutliche Sensitivität gegenüber der Modellauflösung wurde inzwischen jedoch auch von anderen internationalen Modelliergruppen gefunden, und die Erforschung der Mechanismen wird in Folgeprojekten (aktuell Ocean Alk-Align) weiter untersucht.

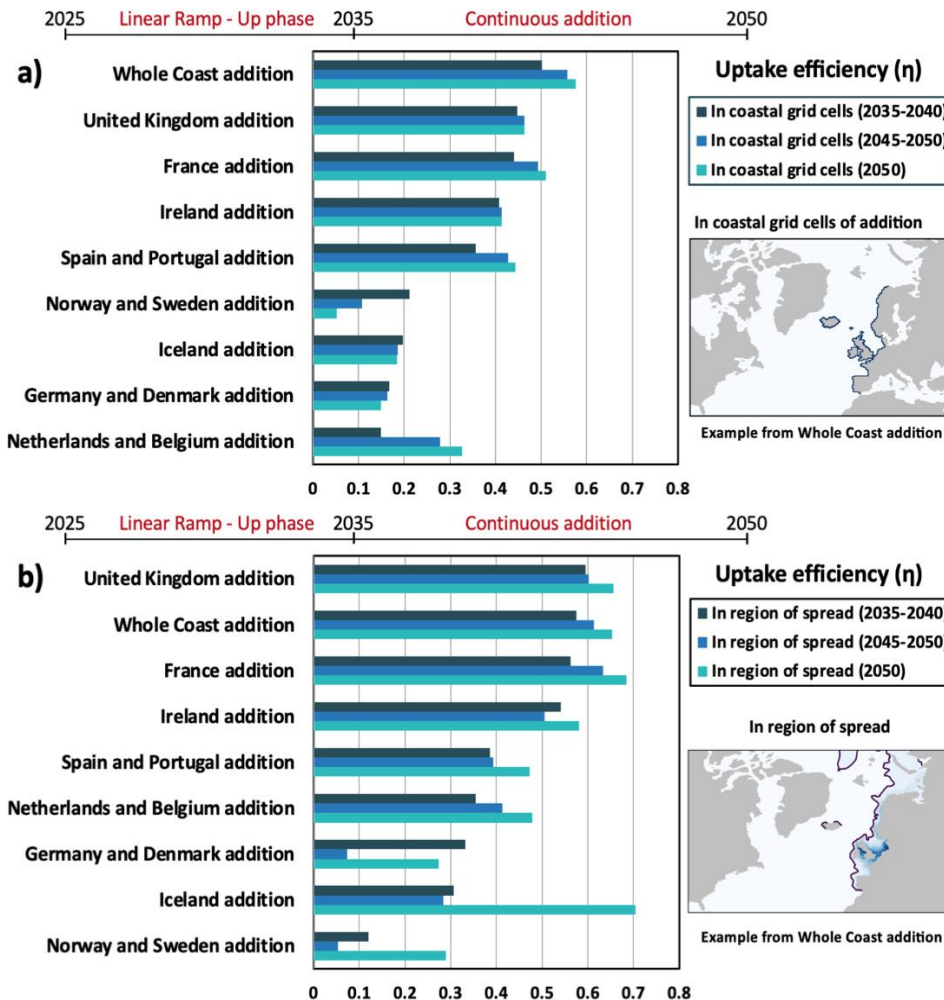


Abb. 13: Simulierte Effizienz der CO₂-Entnahme bei der Erhöhung der Alkalinität in nationalen Küstengewässern verschiedener europäischer Staaten im Hinblick auf das Szenario SSP3-7.0 mit hohen Emissionen. a) berechnet in Küstengitterzellen der Alkalinitäts-erhöhung b) berechnet in der Ausbreitungsregion, in der die Änderung der Oberflächenalkalität mehr als 100 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ beträgt.

Die Simulation von regionalen Einträgen von Alkalinität entlang der europäischen Atlantikküste ergab unerwartet starke regionale Unterschiede in der Effizienz hinsichtlich der CO₂-Aufnahme in verschiedenen Küstenabschnitten (Abb.4). Die Effizienz wurde hier definiert als die Änderung des gelösten inorganischen Kohlenstoffs pro Änderung der Alkalinität in dem betreffenden Wasservolumen. Der theoretische Wert bei vollständigem Gasaustausch liegt bei etwas 0.8. Wird die Effizienz nur für die Küstengitterzellen berechnet, in denen die Alkalinität ausgebracht wurde, so ergeben sich niedrige Werte vor allem für Regionen mit tiefer Vermischung (Island, Norwegen & Schweden) und daher unvollständigem Gasaustausch und Regionen mit starkem lateralem Transport aus der Küstenregion heraus (Deutschland & Dänemark, Niederlande & Belgien). Wird das Gebiet ausgedehnt auf die Region, in der der simulierte Anstieg der Alkalinität im Oberflächenwasser mehr als 100 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ beträgt, erhöhen sich die Effizienzen entsprechend (Abb. 13).

AP3.3: CO₂-Bilanzierung und Kosten-Nutzen-Rechnung

Es wurde eine Vielzahl von marinen CDR-Simulationen unter unterschiedlichen Emissionsszenarien für Alkalinitätssteigerung und Kultivierung von Makroalgen durchgeführt. Dabei wurden viele der nur ungenügend bekannten Parameter des biogeochemischen Ozeanmodells sowie des diffusen Transports in Atmosphäre und Ozean variiert, um eine quantitative Abschätzung der parametrischen Unsicherheiten in den Modellergebnissen zu gewinnen. Die Modellergebnisse und Unsicherheiten wurden an die RETAKE Arbeitsgruppe am IfW weitergeleitet, wo sie wesentlich zur Kalibration des dort betriebenen Integrated Assessment Modells (BEAM eingekoppelt in DICE) beigetragen haben. Dadurch wurde eine robuste quantitative Betrachtung mariner CDRs in einem Integrated Assessment Modell ermöglicht.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Mehr als 80% des Budgets wurden für wissenschaftliche Mitarbeitende und Personal im Bereich der Wissenschaftskoordination und dem Transfer verwendet. Die übrigen Ausgaben deckten die Reisekosten, ein deutlich kleinerer Anteil waren die Publikationskosten. Die übrigen Sachmittel wurden zu gleichen Teilen für Material für das Benthosexperiment und für Dienstreisen zu projektinternen Workshops und Statustagungen, sowie für Konferenzteilnahmen verwendet. Den größten Posten der Sachmittelausgabe stellte die Ausrichtung der jährlichen CDRmare Jahresversammlungen dar, zu denen bis zu 150 aktive Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler missionsübergreifend teilnahmen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt RETAKE erzielten Ergebnisse wären ohne die Förderung des BMBF nicht erreicht worden. Alle im Rahmen des Projektes geleisteten Arbeiten waren für das Erreichen der formulierten Projektziele erforderlich. Die Projektmittel wurden ausschließlich für die in diesem Bericht bzw. auch in den Berichten der Partnerinstitutionen genannten Arbeiten eingesetzt. Die Arbeiten erfolgten nach Maßgabe des bewilligten Arbeitsplanes und waren somit angemessen.

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

Sämtliche im bei Antragstellung vorgelegten Verwertungsplan genannten Punkte konnten erfolgreich erfüllt werden. Insbesondere wurden wichtige Ergebnisse zur Eignung unterschiedlicher Materialien für die Alkalisierung erzielt (Fuhr et al., 2022; 2024) und eine Abschätzung des Potenzials von kalkbasierter Alkalisierung für die Ostsee erarbeitet (Fuhr et al. in review). Ergebnisse des RETAKE Projekts waren wesentlich für die Publikation des internationalen Best Practices Guide for Ocean Alkalinity Enhancement Research (Oschlies et al., 2023) und sind bereits in den Bericht der Working Group III des 6. Sachstandsberichts des IPCC eingeflossen. Das Team RETAKE ist aktiv in die Entwicklung der Langfriststrategie Negativemissionen des BMWK eingebunden, bringt die Ergebnisse in die Arbeit der GESAMP Working Group on Ocean Interventions for Climate Change Mitigation ein und hat in vielen Arbeitstreffen mit dem UBA und über das BMBF wesentlich und mit Erfolg auf die geplante Änderung des Hohe See Einbringungsgesetzes (HSEG) hinsichtlich Feldexperimenten hingewirkt.

Die in AP3.2 gefundene überraschende Sensitivität der simulierten Kohlenstoffaufnahme gegenüber der Modellauflösung hat den Ausschlag für ein neues, ebenfalls am GEOMAR verortetes Teilprojekt in dem internationalen Ocean Alk-Align Projekt gegeben, wo die zugrundeliegenden Mechanismen seit Ende 2024 gezielt und detailliert untersucht werden.

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

Während der Laufzeit des Projekts wurden in mehreren Ländern, vor allem USA, Forschungsprojekte zum Thema Alkalisierung gestartet, häufig in enger Kooperation oder unter Leitung von Start-ups, und mit starkem Druck auf die schnelle Durchführung von Feldexperimenten zur Demonstration einzelner Methoden des Alkalinitätseintrags. In diesem stark kommerziell betriebenen Umfeld wurde das öffentlich finanzierte RETAKE Projekt international als Quelle verlässlicher Information gesehen. Dies führte auch zur Übernahme neuer Verantwortlichkeiten, u.a. der Koordination des Best Practices Guide for Ocean Alkalinity Enhancement Research (Oschlies et al., 2023). Für diese sich während der Laufzeit zusätzlich ergebenden Aufgaben konnte eine externe Finanzierung gefunden werden, so dass der RETAKE Arbeitsplan unverändert erfüllt werden konnte.

II.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Veröffentlichungen - peer-reviewed

Dale, A. W., Geilert, S., Diercks, I., Fuhr, M., Perner, M., Scholz, F. und Wallmann, K. (2024) *Seafloor alkalinity enhancement as a carbon dioxide removal strategy in the Baltic Sea*. Communications Earth & Environment, 5. Art.Nr. 452. DOI [10.1038/s43247-024-01569-3](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01569-3).

Dale, A. W. (2024) *A biogeochemical model for Boknis Eck sediments (Baltic Sea)*. DOI [10.5281/zenodo.11501964](https://doi.org/10.5281/zenodo.11501964).

Eisaman, M. D., Geilert, S., Renforth, P., Bastianini, L., Campbell, J., Dale, A. W., Foteinis, S., Grasse, P., Hawrot, O., Löscher, C. R., Rau, G. H. und Rønning, J. (2023) *Assessing the technical aspects of ocean-alkalinity-enhancement approaches*. State Planet : SP, 2-oae2023 (Chapter 3). pp. 1-29. DOI [10.5194/sp-2-oae2023-3-2023](https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-3-2023).

Farkas, J., Wallmann, K., Mosley, L., Staudigel, P., Zheng, X. Y., Leyden, E., Shao, Y., Fryda, J., Holmden, C. und Eisenhauer, A. (2024) *Alkalinity and elemental cycles in present and past ocean: Insight from geochemical modeling and alkali and alkaline earth metal isotopes*. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, Rotterdam, pp. 1-55. DOI [10.1016/B978-0-323-99762-1.00037-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00037-1).

Fennel, K., M. C. Long, C. Algar, B. Carter, D. Keller, A. Laurent, J. P. Mattern, R. Musgrave, A. Oschlies, J. Ostiguy, J. B. Palter, and D. B. Whitt (2023), *Modelling considerations for research on ocean alkalinity enhancement (OAE)*. State Planet, 2-oae2023, 1-29, DOI [10.5194/sp-2-oae2023-9-2023](https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-9-2023)

Fuhr, M., Wallmann, K., Dale, A. W., Kalapurakkal, H. T., Schmidt, M., Sommer, S., Deusner, C., Spiegel, T., Kowalski, J. und Geilert, S. (2024) *Alkaline mineral addition to anoxic to hypoxic Baltic Sea sediments as a potentially efficient CO₂-removal technique*. Frontiers in Climate, 6. Art.Nr. 1338556. DOI [10.3389/fclim.2024.1338556](https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1338556).

Fuhr, M., Wallmann, K., Dale, A. W., Diercks, I., Kalapurakkal, H. T., Schmidt, M., Sommer, S., Böhnke, S., Perner, M. und Geilert, S. (2023) *Disentangling artificial and natural benthic weathering in organic rich Baltic Sea sediments*. Frontiers in Climate, 5. Art.Nr. 1245580. DOI [10.3389/fclim.2023.1245580](https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1245580).

Fuhr, M., Geilert, S., Schmidt, M., Liebetrau, V., Vogt, C., Ledwig, B. und Wallmann, K. (2022) *Kinetics of Olivine Weathering in Seawater: An Experimental Study*. Frontiers in Climate, 4. Art.Nr. 831587. DOI [10.3389/fclim.2022.831587](https://doi.org/10.3389/fclim.2022.831587).

Ginzky, H., and A. Oschlies (2024), *Effective control mechanisms of research on climate engineering techniques for the public good – the London Protocol regulatory approach as a role model*. Frontiers in Climate, 6, DOI [10.3389/fclim.2024.1474993](https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1474993)

Grünhagen, C., Schwermer, H., Wagner-Ahlf, C., Voss, R., Gross, F. und Riekhof, M. C. (2023) *The multifaceted picture of transdisciplinarity in marine research*. In: Transdisciplinary Marine Research: Bridging Science and Society. , ed. by Gomez, S. und Köpsel, V. Routledge, London, UK, pp. 3-26. ISBN 978-1-032-31760-1. DOI [10.4324/9781003311171-2](https://doi.org/10.4324/9781003311171-2).

- Hartmann, J., Suitner, N., Lim, C., Schneider, J., Marin-Samper, L., Aristegui, J., Renforth, P., Taucher, J. und Riebesell, U. (2023) *Stability of alkalinity in Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) approaches – consequences for durability of CO₂ storage*. Biogeosciences (BG), 20 (4). pp. 781-802. DOI [10.5194/bg-20-781-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-781-2023).
- Jeltsch-Thömmes, A., G. Tran, S. Lienert, D. P. Keller, A. Oschlies, and F. Joos (2024), Earth system responses to carbon dioxide removal as exemplified by ocean alkalinity enhancement: tradeoffs and lags. Environm. Res. Lett., 19, 054054, DOI [10.1088/1748-9326/ad4401](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4401)
- Kowalczyk, K. A., Amann, T., Strefler, J., Vorrath, M. E., Hartmann, J., De Marco, S., Renforth, P., Foteinis, S. und Kriegler, E. (2024) *Marine carbon dioxide removal by alkalization should no longer be overlooked*. Environmental Research Letters, 19 (7). Art. Nr. 074033. DOI [10.1088/1748-9326/ad5192](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5192).
- Oschlies, A., Bach, L. T., Rickaby, R., Satterfield, T., Webb, R. M. und Gattuso, J. P. (2023) *Climate targets, carbon dioxide removal and the potential role of Ocean Alkalinity Enhancement*. State Planet: SP, 2-oe2023 (Chaper 1). pp. 1-9. DOI [10.5194/sp-2-oe2023-1-2023](https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-1-2023).
- Oschlies, A., A. Stevenson, L. T. Bach, K. Fennel, R. E. M. Rickaby, T. Satterfield, R. Webb, and J.-P. Gattuso (Eds.) (2023): *Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research*, Copernicus Publications, State Planet, 2-oe2023, <https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023>.
- Ramasamy, M., Amann, T. und Moosdorf, N. (2024) *Regional potential of coastal ocean alkalization with olivine within 100 years*. Environmental Research Letters, 19 (6). Art.Nr. 064030. DOI [10.1088/1748-9326/ad4664](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4664).
- Rickels, W., Meier, F., Peterson, S., Rühland, S., Thube, S., Karstensen, J., Posern, C., Wolff, C., Vafeidis, A. T., Grasse, P. und Quaas, M. (2024) *The ocean carbon sink enhances countries' inclusive wealth and reduces the cost of national climate policies*. Communications Earth & Environment, 5. Art.Nr. 513. DOI [10.1038/s43247-024-01674-3](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01674-3).
- Riebesell, U., Basso, D., Geilert, S., Dale, A. W. und Kreuzburg, M. (2023) *Mesocosm experiments in ocean alkalinity enhancement research*. State Planet: SP, 2-oe2023 (Chapter 6). pp. 1-14. DOI [10.5194/sp-2-oe2023-6-2023](https://doi.org/10.5194/sp-2-oe2023-6-2023).
- Wallmann, K., Geilert, S. und Scholz, F. (2023) *Chemical Alteration of Riverine Particles in Seawater and Marine Sediments: Effects on Seawater Composition and Atmospheric CO₂*. American Journal of Science, 323. Art. Nr. 7. DOI [10.2475/001c.87455](https://doi.org/10.2475/001c.87455).
- Xin, X., Faucher, G. und Riebesell, U. (2024) *Phytoplankton Response to Increased Nickel in the Context of Ocean Alkalinity Enhancement*. Biogeosciences (BG), 21(3). pp. 761-772. DOI [10.5194/bg-21-761-2024](https://doi.org/10.5194/bg-21-761-2024).
- Wallmann, K., Diesing, M., Scholz, F., Rehder, G., Dale, A. W., Fuhr, M. und Suess, E. (2022) *Erosion of carbonate-bearing sedimentary rocks may close the alkalinity budget of the Baltic Sea and support atmospheric CO₂ uptake in coastal seas*. Frontiers in Marine Science, 9. Art.Nr. 968069. DOI [10.3389/fmars.2022.968069](https://doi.org/10.3389/fmars.2022.968069).

Veröffentlichungen - non-peer-reviewed

- Ginzky, H. and A. Oschlies (2023), Gemeinwohlorientierte staatliche Steuerung der Forschung von Climate Engineering Techniken - das Model London Protokoll. Warnsignale Klima
- Oschlies, A. (2023) Das Pariser Klimaabkommen und die Bedeutung des Climate Engineering. Warnsignale Klima
- Oschlies, A., and G. Rehder, on behalf of the CDRmare Executive Board and ASMASYS Consortium (2022). Submission to EU Call for Evidence: Certification of Carbon Removals, ID number 3254590, <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/api/download/090166e5ebb38a95>
- Oschlies, A., N. Mengis, G. Rehder, E. Schill, H. Thomas, K. Wallmann und M. Zimmer (2023), Mögliche Beiträge geologischer und mariner Kohlenstoffspeicher zur Dekarbonisierung. In "Klimawandel in Deutschland".

Eingereichte Manuskripte (peer-reviewed)

Bährle, R., Baaske, R., Bornemann, T., Fuhr, M., Böhnke, S., Soares, A., Dale, A. W., Probst, A., Geilert, S., and Perner, M. Calcite addition as a CO₂ removal strategy in seasonal hypoxic coastal waters promotes cable bacteria initiating changes in local biogeochemical cycles. *ISME Journal*, submitted December 2024.

Bährle, R., Melzner, F., Fuhr, M., Böhnke, S., Dale, A. W., Geilert, S., and Perner, M. Shifts in the microbial community during one-year benthocosm experiments applying enhanced benthic weathering for active CO₂ removal. *Frontiers Microbiology*, submitted in February 2025.

Dale, A.W., Geilert, S., Diercks, I., Fuhr, M., Perner, M., Scholz, F., & Wallmann, K. (2024) Seafloor alkalinity enhancement as a carbon dioxide removal strategy in the Baltic Sea. *Commun. Earth Environ.* 5, 452. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01569-3>

Eisaman, M. D., Geilert, S., Renforth, P., Bastianini, L., Campbell, J., Dale, A. W., Foteinis, S., Grasse, P., Hawrot, O., Löscher, C. R., Rau, G. H., and Rønning, J.: Assessing the technical aspects of ocean-alkalinity-enhancement approaches, in: *Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research*, edited by: Oschlies, A., Stevenson, A., Bach, L. T., Fennel, K., Rickaby, R. E. M., Satterfield, T., Webb, R., and Gattuso, J.-P., Copernicus Publications, State Planet, 2-oae2023, 3, <https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-3-2023>

Fuhr M, Geilert S, Schmidt M, Liebetrau V, Vogt C, Ledwig B and Wallmann K (2022) Kinetics of Olivine Weathering in Seawater: An Experimental Study. *Front. Clim.* 4:831587. DOI [10.3389/fclim.2022.831587](https://doi.org/10.3389/fclim.2022.831587)

Fuhr M, Wallmann K, Dale AW, Diercks I, Kalapurakkal HT, Schmidt M, Sommer S, Böhnke S, Perner M and Geilert S (2023) Disentangling artificial and natural benthic weathering in organic rich Baltic Sea sediments. *Front. Clim.* 5:1245580. DOI [10.3389/fclim.2023.1245580](https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1245580)

Fuhr M, Wallmann K, Dale AW, Kalapurakkal HT, Schmidt M, Sommer S, Deusner C, Spiegel T, Kowalski J and Geilert S (2024a) Alkaline mineral addition to anoxic to hypoxic Baltic Sea sediments as a potentially efficient CO₂-removal technique. *Front. Clim.* 6:1338556. DOI [10.3389/fclim.2024.1338556](https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1338556)

Fuhr M, Dale AW, Wallmann K, Bährle, R., Kalapurakkal HT, Sommer, S., Spiegel, T., Dobashi, R., Buchholz, B., Schmidt M, Perner, M. and Geilert S (2024b) Calcite takes it all: Benthic weathering potential and costs of calcite and dunite addition to muddy shelf sediments. *Commun. Earth Environ.* Under Review.

Mehendale, N., Kemena, T., Keller, D., and Oschlies, A.: Simulating Ocean Alkalinity Enhancement along the European Coast in an Earth System Model, in prep for ERL special issue on Carbon Dioxide Removal (Jan 2024).

Riebesell, U., Basso, D., Geilert, S., Dale, A. W., and Kreuzburg, M.: Mesocosm experiments in ocean alkalinity enhancement research, in: *Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research*, edited by: Oschlies, A., Stevenson, A., Bach, L. T., Fennel, K., Rickaby, R. E. M., Satterfield, T., Webb, R., and Gattuso, J.-P., Copernicus Publications, State Planet, 2-oae2023, 6, <https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-6-2023>

Wallmann, K., Diesing, M., Scholz, F., Rehder, G., Dale, A. W., Fuhr, M. and Suess, E. (2022) Erosion of carbonate-bearing sedimentary rocks may close the alkalinity budget of the Baltic Sea and support atmospheric CO₂ uptake in coastal seas. *Open Access Frontiers in Marine Science*, 9. Art.Nr. 968069. DOI [10.3389/fmars.2022.968069](https://doi.org/10.3389/fmars.2022.968069)

Yao, W., Morganti, T., Wu, J., Borchers, M., Anschütz, A. A., Bednarz, L. K., Bhaumik, A., Boettcher, M., Burkhard, K., Cabus, T., Sueyi Chua, A., Diercks, I., Esposito, M., Fink, M., Fouqueray, M., Gasanzade, F., Geilert, S., Hauck, J., Havermann, F., Hellige, I., Hoog, S., Jürchott, M., Thanveer Kalapurakkal, H., Kemper, J., Kremin, I., Lange, I., Lencina-Avila, J. M., Liadova, M., Liu, F., Mathesius, S., Mehendale, N., Nagwekar, T., Philippi, M., Leite Neves da Luz, G., Ramasamy, M., Stahl, F., Tank, L., Vorrath, M. E., Westmark, L., Wey, H. W., Wollnick, R., Wolfelschneider, M., Bach, W., Bischof, K., Boersma, M., Daewel, U., Fernandez-Mendez, M., Geuer, J., Keller, D. P., Kopf, A. J., Merk, C., Moosdorf, N., Oppelt, N. M., Oschlies, A., Pongratz, J., Proelss, A., Rehder, G., Rüpke, L. H., Szarka, N., Thrän, D., Wallmann, K. and Mengis, N. (Submitted) 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. *Open Access Earth's Future*. DOI [10.22541/essoar.171650351.11778445/v1](https://doi.org/10.22541/essoar.171650351.11778445/v1)

Veröffentlichungen - CDRmare research mission

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](https://doi.org/10.3289/CDRmare.22_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://doi.org/10.3289/CDRmare.12_V2).

CDRmare (2023) *Minerals for enhanced carbon dioxide uptake by the ocean - Version 2*. CDRmare Research Mission, 8 pp. DOI [10.3289/CDRmare.23_V2](https://doi.org/10.3289/CDRmare.23_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](https://doi.org/10.3289/CDRmare.11_V2).

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](https://doi.org/10.3289/CDRmare.27_V2).

Erven, R. und Boxhammer, T. (2024) *Styleguide for the research mission of the German Marine Research Alliance (DAM) »Marine carbon sinks in decarbonisation pathways«*. CDRmare, 18 pp. DOI [10.3289/CDRmare.41](https://doi.org/10.3289/CDRmare.41).

Placke, M. und Mehrtens, H., eds. (2022) *CDRmare Data Management Plan Template*. CDRmare Research Mission, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany, 7 pp. DOI [10.3289/CDRmare.02](https://doi.org/10.3289/CDRmare.02)

Placke, M. und Mehrtens, H., eds. (2022) *CDRmare Data Policy*. CDRmare Research Mission, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany, 2 pp. DOI [10.3289/CDRmare.01](https://doi.org/10.3289/CDRmare.01).

Presentations

Bährle, R., Böhnke, S., Fuhr, M., Dale, A. W., Geilert, S., and Perner, M. Microbial response in benthic alkalinity enhancement experiments. Vereinigung für Allgemeine Mikrobiologie Jahrestagung (VAAM), Würzburg, June 2024.

Bährle, R., Bornemann, T., Soares, A., Böhnke, S., Fuhr, M., Dale, A. W., Probst, A., Geilert, S., and Perner, M. Enhanced benthic weathering as a CO₂ removal strategy in seasonal hypoxic coastal waters of the Baltic Sea and the effects of cable bacteria activity after re-ventilation of bottom waters. Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie Jahrestagung (VAAM), Bochum, March 2025.

Fuhr, M., Geilert, S., Schmidt, M. and Wallmann, K. (2021) Kinetics of olivine weathering in seawater: an experimental study. [Talk, virtual] In: Goldschmidt Virtual Conference 2021. Juli 2021.

Fuhr M., Geilert, S., Schmidt, M., Liebetrau, V., Vogt, C., Ledwig, B., et al. (2022). Kinetics of olivine weathering in seawater: an experimental study. [Talk] In: Olivine-Conference Amsterdam 2022. Mai 2022.

Fuhr M., (2022). Kohlenstoff: Was ist das, woher kommt es und wo geht's hin?! [Talk] In: Local Conference of Youth (LCOY) Oktober 2022

Fuhr M., Wallmann K., Dale A.W., Diercks I., Kalapurakkal H.T., Schmidt M., Sommer S., Geilert S., 2023. Benthic dunite and calcite weathering as a method for ocean alkalinity enhancement. [Talk] In: EGU General Assembly 2023, Vienna. April 2023.

Fuhr M., Wallmann K., Dale A.W., Diercks I., Kalapurakkal H.T., Schmidt M., Sommer S., Geilert S. (2023). Benthic weathering of dunite and calcite in the Baltic Sea – rocks! (partly) [Talk] In: Rock Weathering Conference, Delft. Mai 2023.

Fuhr M., Dale A.W., Wallmann K., Schmidt M., Sommer S., Deusner C., Kalapurakkal H.T., Spiegel T., Geilert S. (2023). Benthic dunite and calcite weathering as a method for ocean alkalinity enhancement. [Talk] In: Ocean Sciences Meeting 2024, New Orleans. Februar 2024

Mehendale, N., Kemena, T., Keller, D., and Oschlies, A. (2024). Regional differences in uptake during simulation of ocean alkalinity enhancement in an Earth system model. [Talk] In: Ocean Sciences meeting 2024, New Orleans, USA. <https://agu.confex.com/agu/OSM24/meetingapp.cgi/Paper/1481677>

Mehendale, N., Wey, H., Kemena, T., Keller, D., and Oschlies, A.: Simulating Ocean Alkalinity Enhancement along the European Coast in an Earth System Model, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-15984, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15984>, 2023.

Perner, M., Bährle, R., Böhnke, S., Fuhr, M., Dale, A. W., Geilert, S. Impacts on benthic microbial communities by artificially enhanced weathering as a CO₂ removal strategy. Gordon Research Conference on Molecular Basis of Microbial One-Carbon Metabolism (GRC), MA, USA, August 2024.