Sachbericht zum Verwendungsnachweis

TEIL I - Kurzbericht

RETAKE-I (Universität Hamburg)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger:	Universität Hamburg; Institut für Geologie; Fachbereich Erdsystemwissenschaften; Bundesstraße 55, 20146 Hamburg
Förderkennzeichen:	U4603BMB2102
Vorhabenbezeichnung:	DAM Dekarbonisierung - RETAKE: Quantifizierung der Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen atmosphärischer CO_2-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung (AE); sowie Kinetik und Nutzung neuer Materialien für die Ozeanalkalinisierung
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2021 – 31.07.2024
Autor:innen:	Niels Suitner E-Mail: niels.suitner@uni-hamburg.de
Datum:	20.12.2024

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

Aufgabenstellungen in AP1.1 umfassten Untersuchungen zur Anwendung und Effizienz verschiedener Materialien zur Alkalinisierung von Meerwasser. Hierbei sollte das Lösungsverhalten diverser Mineralprodukte sowie die Erprobung von Reaktortechnologien zur kontrollierten und effizienten Erzeugung von alkalischen Lösungen zur Alkalinitätserhöhung (AE) untersucht werden. Zudem sollten ökonomische Kostenkurven für das CO_2-Sequestierungspotential durch die AE im Meer abgeleitet werden.
In Anbetracht der Komplexität und Diversität potentieller Methoden zur AE bestand und besteht die Notwendigkeit spezifische Aspekte und Prozesse eingehender zu betrachten. Ohne Kenntnisse über die Umwelteinflüsse oder die Effizienz der genannten Methoden ist eine Skalierung zur Erreichung relevanter CO_2-Sequestrierungsraten kaum zu realisieren. Jüngste Studien zeigten hierzu Reichweiten für die Verträglichkeit verschiedener Alkalinisierungsstufen/-Verfahren auf pelagische Ökosysteme (siehe bspw. Resultate in AP 1.2) oder die Stabilität der eingebrachten Alkalinität. Die dabei erzeugten Veränderungen im Karbonatsystem des behandelten Wassers gehen dabei mit grundlegenden Abweichungen natürlicher Bedingungen einher. So resultiert eine AE auch in einem erhöhten Sättigungssindex, was zu Fällungen von Calziumcarbonat führen kann. Der erhöhte pH-Wert und der niedrigere CO_2-Partialdruck beeinflusst zudem biogeochemische Gleichgewichte im Ozean.
Mit der einhergehenden Untersuchung von Alkalinitätsreaktoren erlauben die geleisteten Arbeiten in diesem AP eine Einschätzung des Potentials der Technologie alkalische Lösungen zu generieren. Reaktoren bieten hierbei die Möglichkeit unter kontrollierten Bedingungen die einzubringende Alkalinität in die Umwelt zu dosieren, sodass potentielle Grenzwerte nicht überschritten werden. Zudem lässt sich durch eine integrierte CO_2-Sättigung des behandelten Wassers auch kostengünstiger Kalkstein als Quelle für die AE verwenden. Unter durchschnittlichen natürlichen Bedingungen wäre eine Lösung von Kalk in Meerwasser ansonsten nicht möglich. Eine Anwendung von Alkalinitätsreaktoren fand bislang nur in vereinzelten Pilotprojekten zur Behandlung von versauerten Tagebauseen oder zur CO_2-Abscheidung in Kraftwerken statt, eine systematische Untersuchung zur Ozeanalkalinisierung war bis zum Start des Projekts noch nicht erfolgt.

2. Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen von RETAKE I wurde ein Laborreaktor geplant und konstruiert und mit dessen Hilfe rund 160 Versuche zur Alkalinisierung von Fluss- und Ozeanwasser durchgeführt. Hierbei lag der Fokus auf der generellen Anwendbarkeit von Reaktortechnologien und den Materialien zur Alkalinisierung.
In einer Laborstudie wurde zudem die Stabilität der Alkalinität von Flusswasser untersucht. In Kooperation mit den Projektpartnern vom GEOMAR und AWI wurden während der Mesokosmenkampagne auf Helgoland eine Reihe von Laborexperimenten zu Verdünnungsprozessen nach dem Einbringen der Alkalinität in den Ozean realisiert. In Zusammenarbeit mit dem PIK wurden zudem technoökonomische Abschätzungen für die Anwendung von AE-Szenarien auf dem offenen Ozean durchgeführt.

3. Wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (Fels GmbH; Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. und Planeteers GmbH) wurden rund ein Dutzend verschiedene Materialien zur AE ermittelt und auf Eignung untersucht. Zu den untersuchten Materialien zählen verschiedene Arten von Kalksteinen, Weisskalkhydrate (Calziumhydroxid), Mischfüller sowie Natrium- und Magnesiumhydroxide. Aufgrund der geringen Lösungsraten

wurden Silikatgesteine/-minerale nicht näher betrachtet. Calziumhydroxid und verschiedene handelsübliche Kalkprodukte erwiesen sich hierbei als die vielversprechendsten Optionen. Für die Inbetriebnahme des Laborreaktors waren zunächst umfangreiche Versuchsreihen zur Sicherstellung konsistenter und reproduzierbarer Ergebnisse von Nöten. Ziel dieser Versuche war, die wesentlichen Prozesse zu isolieren, die das Potenzial der Reaktortechnologie bestimmen, um für zukünftige hochskaliere Feldreaktoren Optimierungen zu erzielen, die zu höheren Effizienzen führen. Produkte auf Kalksteinbasis erwiesen sich zur AE als effektiv und ermöglichen eine Alkalinisierung von bis zu 12 mmol kg^{-1}, nach einer Aufarbeitungszeit des Materials von rund 5 min. Die Verwendung von Kalkstein als Alkalinisierungsmaterial resultierte in einer CO_2-Sequestierungseffizienz von bis zu 17% des simulierten Abgasstroms. Mit Calziumhydroxid konnten Effizienzen von rund 80% erreicht werden. Während Calziumhydroxid zwar deutlich höhere Effizienzen aufweist, ist dessen Herstellung jedoch mit hohem Energieaufwand verbunden. Kalkstein und Kreide erzielen zwar geringere Sequestierungsraten, benötigen aber auch nur einen Bruchteil der Energie in der Gewinnung. Insgesamt wurden rund 160 Reaktorversuche mit verschiedenen Kombinationen aus Alkalinisierungssubstanzen, Materialkonzentrationen und Residenzzeiten im Reaktor durchgeführt. Als First-Of-A-Kind Reaktor bestehen jedoch physikalische Limitationen in der Funktionsweise und Effizienz des errichteten Laborreaktors.

Für den Betrieb eines Reaktors zur AE ist neben der technischen Anlage auch ein Reservoir zur Verbringung der Alkalinität erforderlich. Im Rahmen eines Laborversuchs wurde hierzu eine erste Versuchsreihe zur Alkalinisierungskapazität von ästuarinem Elbewasser durchgeführt. Hierbei stand die Stabilität der Alkalinität, also der Zeitrahmen sowie die Alkalinisierungsreichweiten, in denen keine sekundären Fällungen von Karbonatmineralen auftreten, im Fokus. Anhand solcher Untersuchungen lassen sich somit obere Alkalinisierungsgrenzwerte bestimmen.

Bei der Einbringung von Alkalinität in den Ozean oder Fließgewässer würden unter durchschnittlichen Bedingungen Verdünnungsprozesse einsetzen, welche das Potential für Ausfällungen deutlich verringern. In weiteren Versuchsreihen zu den Stabilitätsbereichen der Alkalinität wurden verschiedene Verdünnungsschritte durchgeführt. Während einer Laufzeit von 6 Tagen wurden zwei Alkalinitätsstufen in den verschiedenen Schritten mit unbehandeltem Wasser verdünnt (Startalkalinitäten ΔTA 2000 und 2600 µmol kg^{-1}, Salinität ~32 psu, Temperatur ~9°C). In allen Versuchen zeigte sich die Verdünnung als effektiv. Angestoßene Ausfällungsprozesse konnten hierbei für den Versuchszeitraum verlangsamt oder gänzlich unterbunden werden.

In Zusammenarbeit mit dem PIK wurden technoökonomische Abschätzungen für die Anwendung von AE-Szenarien auf dem offenen Ozean durchgeführt. Dabei wurden die entstehenden Kosten für die CO_2-Sequestrierung in Meerwasser nach Eingabe von Calziumhydroxid unter Verwendung von Schiffen evaluiert. Allerdings fehlen bislang Feldversuche, um die Berechnungen und die Validität der hinterlegten Annahmen bestätigen zu können. Da die technoökonomische Bewertung keine wesentlichen Hindernisse aufzeigte, sollten die zukünftigen Schwerpunkte der Forschung zu marinen Kohlenstoffentnahmestrategien verstärkt auf die Auswirkungen auf Ökosysteme, Governance sowie Monitoring, Berichterstattung und Verifizierung des aus der Atmosphäre gebundenen CO_2 ausgerichtet sein. Des Weiteren sollte der Fokus auf die Entwicklung und Evaluierung von Technologien zur marinen AE gelegt werden, um zu klären, ob die Anwendung karbonatbasierter Substanzen und anderer Materialien im Rahmen einer umfassenderen Strategie zur Kohlenstoffentnahme in Betracht gezogen werden sollte.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

TEIL II - Eingehende Darstellung

RETAKE-I (Universität Hamburg)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger:	Universität Hamburg; Institut für Geologie; Fachbereich Erdsystemwissenschaften; Bundesstraße 55, 20146 Hamburg
Förderkennzeichen:	U4603BMB2102
Vorhabenbezeichnung:	DAM Dekarbonisierung - RETAKE: Quantifizierung der Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen atmosphärischer CO_2-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung (AE); sowie Kinetik und Nutzung neuer Materialien für die Ozeanalkalinisierung
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2021 – 31.07.2024

Autor:innen:	Niels Suitner E-Mail: niels.suitner@uni-hamburg.de

Datum:	20.12.2024

1. Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen

Übersicht

Jüngste Studien haben die Aufmerksamkeit auf die Stabilität der Alkalinität und die Empfindlichkeit gegenüber unkontrollierten Ausfällungen von Karbonaten im Meerwasser während Ozeanalkalinisierungsszenarien gelenkt. Moras et al. (2022) zeigten, dass der Saturationsindex von Aragonit (Ω_{Ar}) als entscheidender Parameter zur Bildung von sekundären Ausfällungen angenommen werden kann. Unter Verwendung von Calziumoxid- und Hydroxid-Mineralprodukten wurde die Alkalinität von Meerwasser um 500 µmol kg^{-1} erhöht, wobei ein Ω_{Ar} von 5 überschritten wurden, sodass ein wesentlicher Anteil der Alkalinität durch Karbonatausfällungen verloren ging. Die Anwendung von Feststoffen, wie Gesteins- oder Mineralpulver, senkt hierbei die kritischen Ω_{Ar} Schwellenwerte im Vergleich zu flüssigen alkalischen Stammlösungen auf derselben Mineralbasis. Suitner et al. (2024) demonstrierten, dass die Zugabe von Stammlösungen eine Alkalinitätserhöhung (AE) von über 2000 µmol kg^{-1} erlaubten, sofern eine Verdünnung mit unbehandelten Wässern innerhalb eines Tages gewährleistet werden kann. Bei den angeführten experimentellen Ansätzen handelt es sich um eine Zugabe, welche eine AE erzielt, die nicht im Gleichgewicht mit dem CO_2 der Atmosphäre steht. Demgegenüber konnte Meerwasser im CO_2-Gleichgewicht zur Atmosphäre um über 9000 µmol kg^{-1} erhöht werden, ohne Alkalinitätsverluste beobachten zu können. Um ein CO_2-Gleichgewicht mit der Atmosphäre zu erzielen, können Karbonatprodukte wie Natriumbikarbonat, Natriumcarbonat oder Calcit (bspw. aus Kalkstein) herangezogen werden (siehe Abb. 1). Während die natriumbasierten Phasen kaum als förderbare Minerale in Gesteinen vorliegen, stellt Kalkstein eine global vorhandene Ressource dar, welche bspw. als Basis für die Zementherstellungen verwendet wird. Die damit einhergehende bereits bestehende Infrastruktur zur Förderung von Kalk könnte als Grundlage für eine großskalige Anwendung für AE-Szenarien dienen. Jedoch verhindert die Matrix gelöster chemischer Spezies im Meerwasser (Mg^{2+}, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, etc.) unter durchschnittlichen natürlichen Bedingungen eine Lösung von Kalk in Meerwasser. Um dennoch eine Anwendung von Kalkstein als Produkt zur Ozeanalkalinisierung zu ermöglichen, könnten CO_2-gesättigte Lösungen verwendet werden, um eine Auflösung des Materials und der damit verbundenen AE zu erreichen. Alternativ könnten auch sich nicht im CO_2-Gleichgewicht befindende Wässer, bspw. generiert durch Auflösung von Natrium-/Calzium-Hydroxiden oder silikatischen Gesteinen, durch Eingasen von CO_2 in die Lösung in ein Gleichgewicht mit der Atmosphäre gebracht werden (siehe uptake Vektor in Abb. 1).

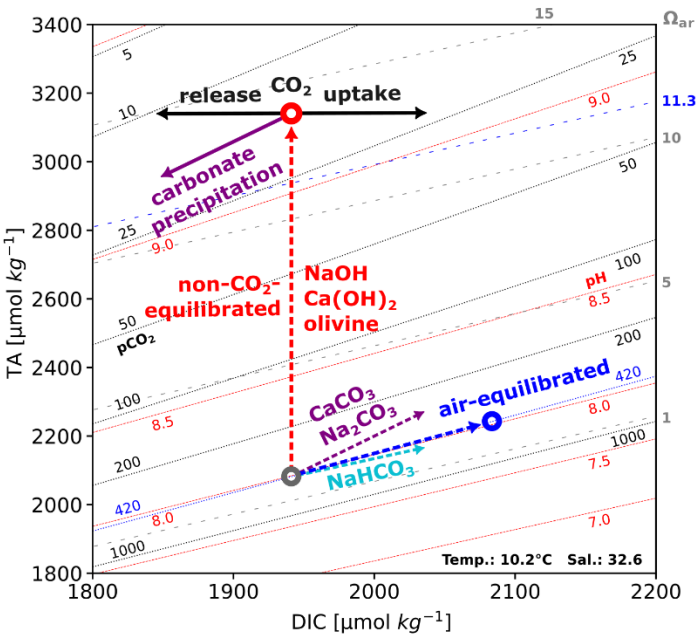


Abb. 1: TA:DIC-Diagramm, Figure 1 aus Suitner et al. (2024); mit Auswirkungen diverser relevanter Prozesse für ozeanbasierte AE auf das Karbonatsystem. Im Hintergrund Isolinien für pH, Saturationsindex von Aragonit (Ω_{ar}) und CO_2-Partialdruck (pCO_2). Die Vektoren zeigen die Veränderungen der Karbonatchemieparameter beim Lösen der jeweiligen Materialien, der CO_2-Aufnahme und -Abgabe sowie der Karbonatfällung im Falle einer anhaltenden Übersättigung.

Beide Methoden können mit der Anwendung von Reaktortechnologien erreicht werden. Zur Regulierung von sauren, gefluteten Kohletagebauseen finden solche Technologien bereits Anwendung (z. B. Koch und Mazur, 2016; Strzodka et al., 2016).
Bisher wurden nur wenige Studien zur Anwendung von Karbonaten zur CO_2-Fixierung während der Abgaswäsche von Industrieabwässern im Labormaßstab durchgeführt (Rau, 2011; Haas et al., 2014; Chou et al., 2015; Berry et al., 2018; Ohnemüller et al., 2019) sowie im Pilotmaßstab in einem Biogaskraftwerk (Haas et al., 2014) und einem Kohlekraftwerk (Kirchner et al., 2020a). Sowohl unter Verwendung von Süßwasser als auch von Meerwasser, oder in Labor- und Pilotanlagen, wurde eine unvollständige Lösung von CO_2 aus dem Abgas beobachtet, da während der Reaktionszeit kein Gleichgewicht erreicht wurde. Zudem konnte stets eine unvollständige Auflösung der eingebrachten Karbonate beobachtet werden. Eine Modellstudie zur Alkalinitätsfreisetzung aus der Abgaswäsche im deutschen Nordseegebiet ergab relativ hohe Alkalinitäts-, pH- und Ω_{Ar} Werte in der unmittelbaren Umgebung der Anlage und der angrenzenden Jadebucht. Dies deutet auf die Notwendigkeit eines an die lokalen Bedingungen angepassten Gesamtkonzepts für die AE, wenn Reaktoren in regionalem oder globalem Maßstab eingesetzt werden sollen (Kirchner et al., 2020b).

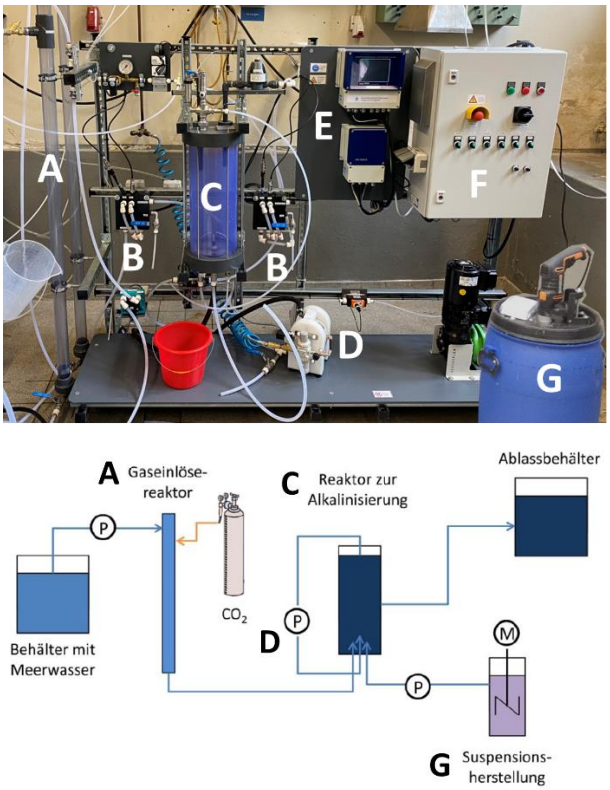


Abb. 2: Übersicht Laborreaktor (UHH); (oben) Reaktor im Labor, (unten) Schemazeichnung Reaktor; (A) Gaseinlösereaktor, (B) Messzelle für pH, Temperatur und Leitfähigkeit, (C) Reaktor zur Alkalinitätserhöhung, (D) Zirkulationsmembranpumpe (E) Datenlogger (F) Schaltschrank (G) Suspensionsbehälter

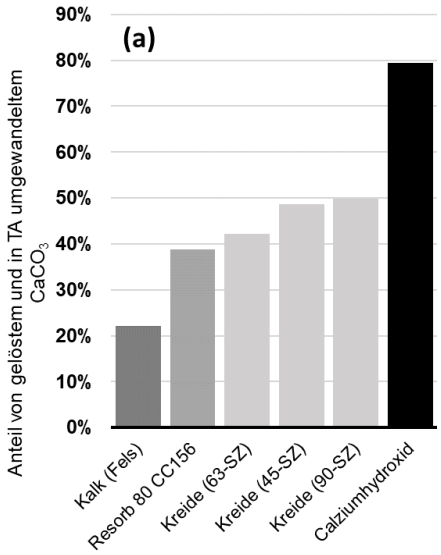
Mit der Konstruktion und Erprobung eines Laborreaktors konnte der ZE einen Beitrag zur Anwendbarkeit von Reaktortechnologien für die Alkalinisierung von Fluss- und Ozeanwässern leisten. Hierbei lag der Fokus, neben der generellen technischen Umsetzung, insbesondere auf der Effizienz verschiedener Mineralprodukte (Calziumhydroxid, sowie diverse handelsübliche Kalkprodukte), sowie verschiedener CO_2-Konzentrationen des simulierten Abgasstroms.
Des Weiteren konnte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vom GEOMAR und AWI ein erweitertes Verständnis für den Einfluss von AE-Praktiken auf die umgebende Umwelt erreicht werden. So konnte eine Beschreibung der primären Einflussfaktoren der sekundären Karbonatausfällungen beigetragen werden. Zudem wurde der Einfluss von Verdünnungsprozessen auf das Ausfallen von sekundären Phasen sowie deren Verhinderung ermittelt, die in natürlichen Systemen die Alkalinitätskonzentrationen rapide senken würden.

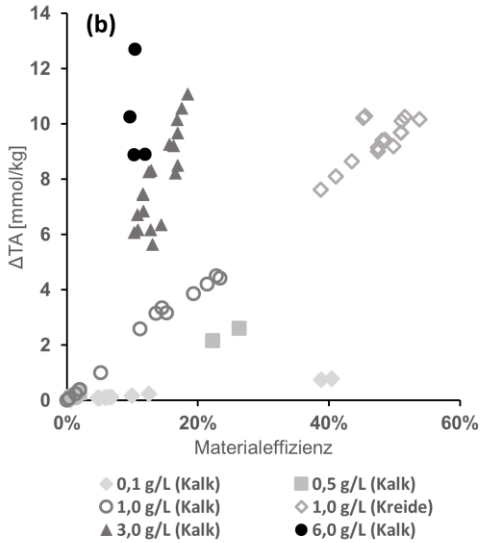
Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht kein Konsens zu Grenzwerten bei der Einbringung von Alkalinität in natürliche Systeme. Dies ist vor allem der Vielzahl verschiedener Anwendungsszenarien geschuldet (diverse Feststoffe oder Stammlösungen für AE; Typus von CO_2-Gleichgewicht zur Atmosphäre; elektrochemisch; lokal um punktquelle oder mobil bspw. über Frachtschiffe, variierende Umweltbedingungen am Zugabepunkt), welche eine Generalisierung erschweren. Umweltverträglichkeitsstudien, die von und mit den Projektpartnern in RETAKE durchgeführt wurden, können hierbei als Richtlinien für verträgliche Grenzwerte verwendet werden. Die untersuchte Reaktortechnologie bietet hierbei auch die Möglichkeit kontrolliert und angepasst an die lokalen/saisonalen Gegebenheiten Alkalinität zu erzeugen und in die Umwelt zu entlassen.
Als Teil der Mesokosmenstudie auf Helgoland 2023 wurde außerdem in Nebenexperimenten die Stabilität der Alkalinität im lokalen natürlichen Meerwasser untersucht. Hierzu wurden Inkubationsflaschen in eine Durchflusskammer verbracht, welche die lokalen Temperatur- und Lichtbedingungen abbildeten. Hierbei wurde auch der Einfluss auf das inkubierte Phytoplankton und dessen Aktivität bestimmt. Gegenüber den parallellaufenden Mesokosmenexperimenten erlaubten die kleinskaligen Inkubationen zwar eine geringere Laufzeit der Experimente (6 Tage), jedoch konnten aufgrund des weniger statischen Designs der Versuche weitaus mehr Alkalinitäts- und Verdünnungsgradienten untersucht werden. Im Folgenden sollen einige Beispiele der erzielten Resultate vorgestellt werden.

Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (Fels GmbH; Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. und Planeteers GmbH) wurden rund ein Dutzend verschiedene Materialien zur AE ermittelt und auf Eignung untersucht. Diese umfassen: 1. Kalksteine diverserer Art und Typen (Herkunft, Reinheit, Korngröße, etc.); 2. Weisskalkhydrate, Weissfeinkalke, Mischfüller (Gemisch $CaCO_3$ und $Ca(OH)_2$) sowie sog. „Staub“ (Abfallprodukt) aus der Zementherstellung; 3. Natrium- und Magnesiumhydroxide; 4. Gemenge aus Natriumcarbonat und -Bicarbonat. In Anbetracht der sehr geringen Lösungsraten, wurden ausdrücklich keine Silikatgesteine/-minerale für die Alkalinisierung vertiefend untersucht. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen zum Lösungsverhalten wurden, unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Kosten, wie erwähnt Calciumhydroxid sowie verschiedene handelsübliche Kalkprodukte als die aussichtsreichsten Materialien zur AE ausgewählt und unter Verwendung des Laborreaktor nähergehend untersucht.
Für die routinemäßige Inbetriebnahme des Laborreaktors waren zunächst weitreichende Versuchsreihen zur Gewährleistung konsistenter und reproduzierbarer Ergebnisse notwendig. Mit zunehmendem Prozessverständnis waren kontinuierlich strukturelle Anpassungen in der Handhabung und Probennahme nötig. Die wesentlichen veränderlichen Faktoren für die Herstellung alkalischer Lösungen unter Verwendungen des Reaktors waren: 1. Korngröße und Typ des Alkalinisierungsmaterials ($CaCO_3$, $Ca(OH)_2$); 2. Die CO_2-Konzentration des simulierten Abgasstroms (15, 30, 100 %) – realisiert durch den Anschluss konventioneller Gasflaschen der jeweiligen Kategorie. Für die verwendeten Mischgase traten während des Eingasungsprozesses Entmischungseffekte auf. Das enthaltene Stickstoff (N_2) bildete, aufgrund dessen geringer Löslichkeit in Wasser, im Bereich des vorgesehenen Wasser-Gaskontaktpunktes (A in Abb. 2) eine Gasblase aus, welche als Konsequenz die beabsichtigte Eingasung von CO_2 signifikant verringerte. Durch manuelles Öffnen eines Ventils konnte die Gasblase zwar stets entfernt werden, sodass die CO_2-Aufnahme wieder regulär ablaufen konnte, doch verhinderte dieses Prozedere das Einstellen konstanter Bedingungen im Reaktor, da das Entgasen etwa alle 5 Minuten wiederholt werden musste und damit eine stetige Inkonsistenz auftrat (für einen regulären Versuchsdurchlauf waren rund 30 min mit stabilen Bedingungen notwendig). Für die Weiterentwicklung des Laborreaktors in RETAKE II ist eine automatisierte Abscheidung des N_2 bei Erreichung eines Schwellenwerts vorgesehen, sodass auch Abgasströme wie sie in der Praxis auftreten systematisch simuliert und untersucht werden können. Gemäß diesen Komplikationen fand das Gros der durchgeführten Experimente unter Verwendung von 100% CO_2-Gas statt. 3. Die Regulation von Residenzzeiten im Reaktor (C in Abb. 2), welche sich primär mechanisch durch Variation der Pumpraten erreichen ließen. Verschiedene Pumpen im System erlauben hierbei die Verhältnisse von CO_2-gesättigtem Wasser und Suspensionslösung zu variieren. Somit können auch

Mengen- und Volumenströme eingestellt werden, was eine Effizienzanalyse verschiedener Ansätze unter Variation von Residenzzeiten im Reaktor, Stoffkonzentrationen und Alkalinisierungsmaterialien erlaubte.
Abb. 3 zeigt hierzu beispielhaft eine Übersicht der Versuche mit verschiedenen Calziumkarbonaten sowie Calziumhydroxid (Weißfeinkalk) (3a) und den Effekt variabler Materialkonzentrationen im Reaktor (3b), sowie Material- und CO_2-Sequestierungseffizienz verschiedener Materialien (3c). Aufgrund der schnellen Lösungskinetik erreicht Calziumhydroxid Effizienzen von rund 80%. Jedoch ist die Herstellung von Calziumhydroxid mit hohem Energieaufwand verbunden. Kalkstein und Kreide erzielen zwar geringere Sequestierungsraten, benötigen aber auch nur einen Bruchteil der Energie in der Gewinnung. Für die Calziumkarbonatprodukte erwies sich eine Materialkonzentration von rund 1 g Substrat pro Liter als Kompromiss zwischen Material- und CO_2-Sequestierungseffizienz (siehe Abb. 3b).





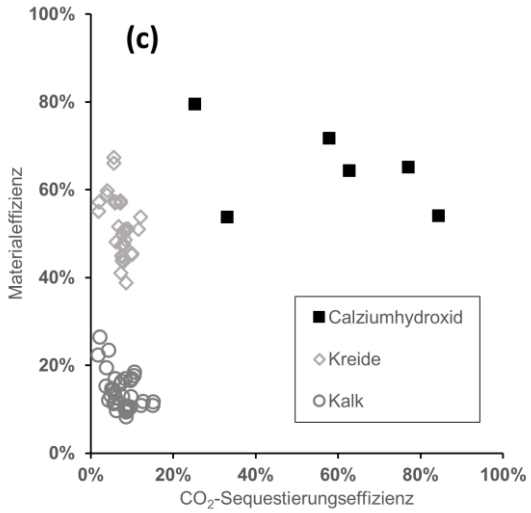


Abb. 3 (a) Maximal erreichte Lösung im Reaktor unter Verwendung verschiedener Calziumkarbonate und Calziumhydroxid (Materialkonzentration stets 1 g/L); (b) Erreichte AE über Materialeffizienz mit variablen Materialkonzentrationen (gerundet); nicht gefüllte Datenpunkte bilden die Datenpunkte aus (a) ab. Die Diskrepanzen in den Materialeffizienzen beider Diagramme rühren von der unvollkommenen Möglichkeit her, die Materialkonzentrationen genau einzustellen. (c) Übersicht Material- und CO_2-Sequestierungseffizienz verschiedener Materialien (hier zusammengefasst zu Gruppen), Ergebnisse diverser Materialkonzentrationen und Residenzzeiten.

Insgesamt wurden rund 160 Versuche mit verschiedenen Kombinationen der genannten Parameter durchgeführt. Für die Bewertung der jeweiligen Experimente werden hier vereinfachend die prozentualen Anteile des sequestrierten CO_2 und des gelösten Alkalinisierungsmaterials herangezogen. Beide Größen stehen bei kosteneffizienten Anwendungsszenarien im Widerstreit. Bei geringen Materialkonzentrationen in der Suspensionsfracht kann zwar das gesamte Substrat gelöst werden, doch fallen dann die CO_2-Sequestierungsraten relativ gering aus. Mit deutlich erhöhtem Materialeinsatz kann hingegen zwar ein erheblicher Anteil des eingebrachten CO_2 gebunden werden, jedoch wird nur ein Bruchteil des Materials gelöst

und verlässt den Reaktor ungenutzt. Beide Umstände könnte evtl. durch Reihenschaltung mehrerer Anlagen gleichen Typs die Effizienz des Gesamtsystems erhöhen. Ziel und Aufgabe der Versuche am Laborreaktor war und ist durch Optimierung der Abläufe und Untersuchung verschiedener Alkalinisierungsmaterialien das Potential der Reaktortechnologie zu ermitteln und dabei die wesentlichen Prozesse zu isolieren, welche das Potential bestimmen. Für einen hochskalierten Feldreaktor in der Anwendung sollten Optimierungen zu wesentlich höheren Effizienzen führen. Der hier gebaute Versuchsreaktor hatte vor allem das Ziel das Verhalten unterschiedlicher Materialien untereinander zu vergleichen, und war nicht für eine maximierte Materialeffizienz ausgelegt.

Für den Betrieb eines Reaktors zur AE ist neben der technischen Anlage auch ein Reservoir zur Verbringung der Alkalinität erforderlich. Im Rahmen eines Laborversuchs wurde hierzu eine erste Versuchsreihe zur Alkalinisierungskapazität von ästuarinem Elbewasser durchgeführt. Hierbei stand die Stabilität der Alkalinität, also der Zeitrahmen sowie die Alkalinisierungsreichweiten, in denen keine sekundären Fällungen von Karbonatmineralen auftreten, im Fokus. Anhand solcher Untersuchungen lassen sich somit obere Alkalinisierungsgrenzwerte bestimmen.

Konkret wurde im durchgeführten Versuch die Stabilität der Alkalinität für typische Residenzzeiten (35 Tage) und Salinitäten (psu 0, 4, 16) des Elbe-Ästuars untersucht (siehe Abb. 4). Bei im Sommer entnommenen Proben ist ein Einfluss der Salinität zu beobachten, wobei eine steigende Salinität mit einer erhöhten Stabilität der Alkalinität einhergeht. Gleichzeitig zeigt das unterschiedliche Verhalten bei gefilterten und ungefilterten Versuchsreihen, dass Sedimentpartikel die Stabilitätsgrenzwerte herabsetzen.

Des Weiteren befindet sich eine Detailstudie zur Parametrisierung der Ausfällungsprozesse in Meerwasser in der Vorbereitung (Suitner et al., in prep). Anhand dieser Parametrisierungen können Vorhersagen über die Stabilität der eingebrachten Alkalinität getätigt werden, sowie der Verlauf des Ausfällungsprozesses mathematisch beschrieben werden, sodass eine Integration des Ausfällungsprozesses in Ozean-Modellierungen möglich ist.

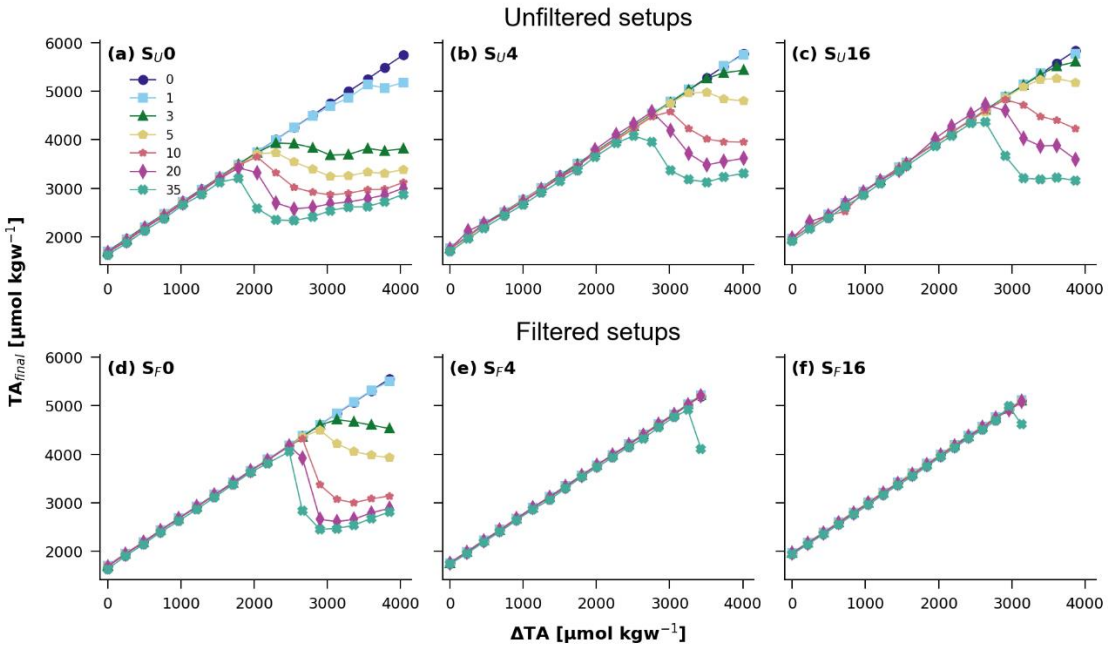


Abb. 4 Gemessene Alkalinität (TA_{final}) über zugegebener Alkalinität (ΔTA) für Stabilitätsversuche mit ästuarinem Elbewasser, mit Alkalinitätsgradient in 200 µmol kgw^{-1} Schritten von ΔTA 0 bis 4000 µmol kgw^{-1}. (a)-(c) ungefilterte und (d)-(f) gefilterte Sommer-Versuche mit untersuchten Salinitäten 0, 4 und 16 psu (siehe Diagrammbeschriftung). Jeder Graph repräsentiert einen Probennahmetag, siehe Legende in (a).

Bei der Einbringung von Alkalinität in den Ozean oder Fließgewässer würden unter durchschnittlichen Bedingungen Verdünnungsprozesse einsetzen, welche das Potential für Ausfällungen deutlich verringern. In weiteren Versuchsreihen zu den Stabilitätsbereichen der Alkalinität wurden verschiedene Verdünnungsschritte

(1:0, 3:1, 1:1, 1:3 und 0:1, Verhältnis von alkalisiertem zu unbehandeltem Wasser) nach 4 Stunden sowie eine 1:1-Verdünnung nach variablen Zeitschritten (10 min, 30 min, 2 Std, 4 Std, 12 Std und 24 Std) durchgeführt. Abb. 5 zeigt hierzu beispielhaft einen Ausschnitt aus den Verdünnungsexperimenten. Während einer Laufzeit von 6 Tagen wurden zwei Alkalinitätsstufen in den oben angeführten Schritten mit unbehandeltem Wasser verdünnt (Startalkalinitäten ΔTA 2000 und 2600 µmol kg^{-1}, Salinität ~32 psu, Temperatur ~9°C). In allen Versuchen zeigte sich die Verdünnung als effektiv. Angestoßene Ausfällungsprozesse konnten hierbei für den Versuchszeitraum verlangsamt oder gänzlich unterbunden werden.

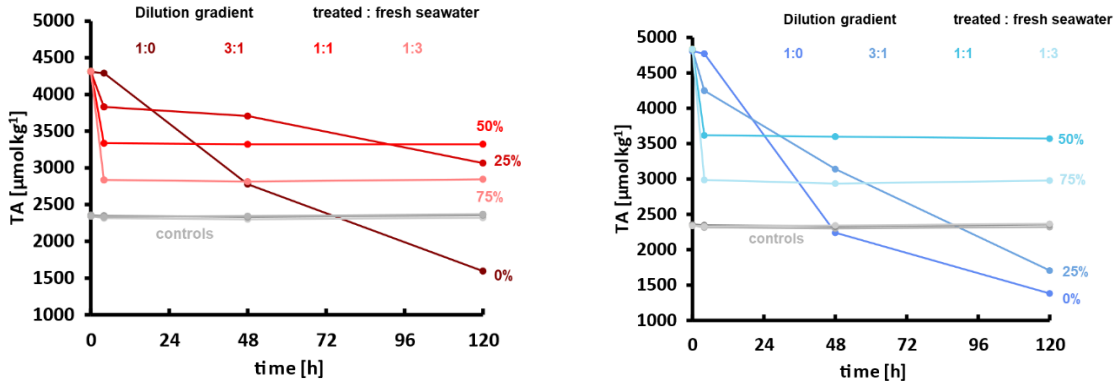


Abb. 5 Verdünnungsexperimente mit den Mischverhältnissen 1:0, 3:1, 1:1, 1:3 und 0:1 (alkalisiertes: unbehandeltes Wasser); (links) ΔTA 2000 µmol kg^{-1}, (rechts) ΔTA 2600 µmol kg^{-1}.

In Zusammenarbeit mit dem PIK wurden technoökonomische Abschätzungen für die Anwendung von AE Szenarien auf dem offenen Ozean durchgeführt. Dabei wurden die entstehenden Kosten für die CO_2-Sequestrierung in Meerwasser nach Eingabe von Calziumhydroxid unter Verwendung von Schiffen evaluiert (siehe Abb. 6). Basierend auf den in Kowalczyk et al. (2024) publizierten Annahmen, zeigen sich hierbei niedrigere Kosten im Vergleich zu anderen DACCS-Verfahren.

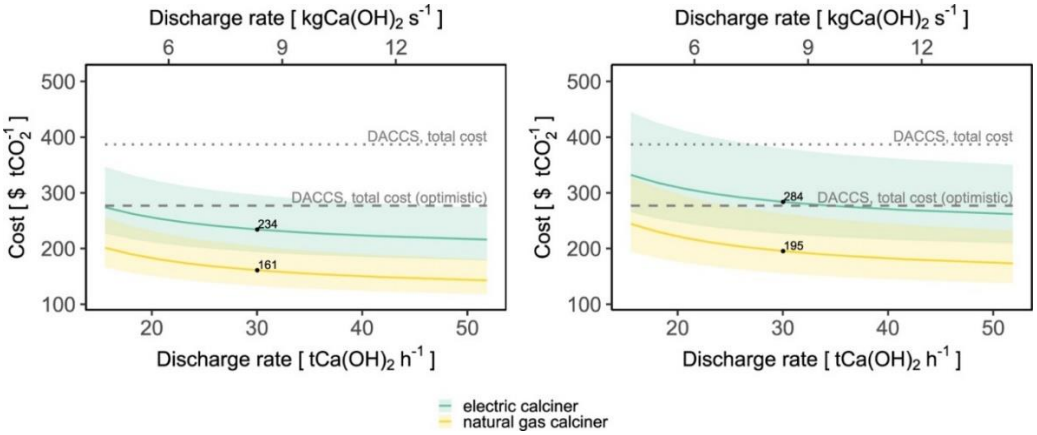


Abb. 6 Kostenkurven für die Anwendung von Calziumhydroxid von Schiffen (Figure 2 aus Kowalczyk et al. (2024))

Allerdings fehlen bislang Feldversuche, um die Berechnungen und die Validität der hinterlegten Annahmen bestätigen zu können. Da die technoökonomische Bewertung keine wesentlichen Hindernisse aufzeigte, sollten die zukünftigen Schwerpunkte der Forschung zu marinen Kohlenstoffentnahmestrategien verstärkt auf die Auswirkungen auf Ökosysteme, Governance sowie Monitoring, Berichterstattung und Verifizierung des aus der Atmosphäre gebundenen CO_2 ausgerichtet sein. Des Weiteren sollte der Fokus auf die Entwicklung und Evaluierung von Technologien zur marinen AE gelegt werden, um zu klären, ob die Anwendung karbonatbasierter Substanzen und anderer Materialien im Rahmen einer umfassenderen Strategie zur Kohlenstoffentnahme in Betracht gezogen werden sollte.

Referenzen

Berry, A., Kirchner, J., Ohnemüller, F., Weber, N., Erich, E., and Brumsack, H.-J. (2018). ECO2 - Entwicklung des Kalksteinmehl-CO2-Waschverfahrens, Praxisoptimierung und ökologische Bewertung. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

Chou, W.-C., Gong, G.-C., Hsieh, P.-S., Chang, M.-H., Chen, H.-Y., Yang, C.-Y., et al. (2015). Potential impacts of effluent from accelerated weathering of limestone on seawater carbon chemistry: A case study for the Hoping power plant in northeastern Taiwan. Marine Chemistry 168, 27–36. doi: 10.1016/j.marchem.2014.10.008.

Haas, S., Berry, A., Erich, E., and Weber, N. (2014). Limestone powder carbon dioxide scrubber as the technology for Carbon Capture and Usage. Cement International 3, 34–45.

Kirchner, J. S., Berry, A., Ohnemüller, F., Schnetger, B., Erich, E., Brumsack, H.-J., et al. (2020a). Reducing CO2 Emissions of a Coal-Fired Power Plant via Accelerated Weathering of Limestone: Carbon Capture Efficiency and Environmental Safety. Environ. Sci. Technol. 54, 4528–4535. doi: 10.1021/acs.est.9b07009.

Kirchner, J. S., Lettmann, K. A., Schnetger, B., Wolff, J.-O., and Brumsack, H.-J. (2020b). Carbon capture via accelerated weathering of limestone: Modeling local impacts on the carbonate chemistry of the southern North Sea. International Journal of Greenhouse Gas Control 92, 102855. doi: 10.1016/j.ijggc.2019.102855.

Koch, C., and Mazur, K. (2016). A new technology of pit lake treatment using calcium oxide and carbon dioxdie to increase alkalinity. Proceedings International Mine Water Association (IMWA).

Kowalczyk, K., Amann, T., Strefler, J., Vorrath, M. E., Hartmann, J., De Marco, S., ... & Kriegler, E. (2024). Marine Carbon Dioxide Removal by alkalinization should no longer be overlooked. Environmental Research Letters. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5192

Moras, C. A., Bach, L. T., Cyronak, T., Joannes-Boyau, R., and Schulz, K. G. (2022). Ocean alkalinity enhancement – avoiding runaway $CaCO_3$ precipitation during quick and hydrated lime dissolution. Biogeosciences 19, 3537–3557. doi: 10.5194/bg-19-3537-2022.

Ohnemüller, F., Berry, A., and Kirchner, J. (2019). Carbonate CO2 scrubbing process II (ECO2) - Entwicklung des Kalksteinmehl-CO2-Waschverfahrens, Praxisoptimierung und ökologische Bewertung. Available at: http://www.fg-kalk-moertel.de/forschungsberichte.html.

Rau, G. H. (2011). CO2 Mitigation via Capture and Chemical Conversion in Seawater. Environ. Sci. Technol. 45, 1088–1092. doi: 10.1021/es102671x.

Strzodka, M., Claus, R., Preuss, V., Thürmer, K., and Viertel, K. (2016). “Advanced treatment of pit lakes using limestone and carbon dioxide,” in Proceedings International Mine Water Association (IMWA) Available at: https://www.imwa.info/docs/imwa_2016/IMWA2016_Strzodka_155.pdf.

Suitner, N., Faucher, G., Lim, C., Schneider, J., Moras, C. A., Riebesell, U., and Hartmann, J. (2024). Ocean alkalinity enhancement approaches and the predictability of runaway precipitation processes: results of an experimental study to determine critical alkalinity ranges for safe and sustainable application scenarios, Biogeosciences, 21, 4587–4604, https://doi.org/10.5194/bg-21-4587-2024.

Suitner, N.; Hartmann, J.; Varliero, S.; Faucher, G.; Moras, C. A.; Suessle, P. (in prep.). Surface area and Ω-aragonite oversaturation as controls of the runaway precipitation process in ocean alkalinity enhancement

CDRmare DAM DEUTSCHE ALLIANZ MEERESFORSCHUNG GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung Freie Hansestadt Bremen Hamburg MV Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur SH

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bedeutendsten Positionen entfielen auf Personalmittel, gefolgt von Investitionsmitteln für den Laborreaktor.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Der Bau des Forschungsreaktors war notwendig, da die Kinetik und das CO_2-Bindungspotential getestet wurden. Die Experimente zur Stabilität der generierten Alkalintät waren notwendig, um die Nachhaltigkeit eingebrachter Alkalinität in Meerwasser abschätzen zu können. Dafür wurden Obergrenzen der Einbringung getestet, sowie deren Dauerhaftigkeit untersucht. Weitere Tests waren notwendig, um die Vermischung von behandeltem Meerwasser mit unbehandeltem zu testen, und zu ermitteln, ob eingebrachte Alkalinität über den bestimmten Grenzwerten durch Verdünnung stabilisiert werden kann. Die Arbeiten für das technoökonomische Assessment waren notwendig, um abschätzen zu können, ob die OAE-Methode im größeren Maßstab sinnvoll ist.

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

Die oben angeführten Vorhaben des ZE zum Lösungsverhalten verschiedener Mineralprodukte, sowie die zahlreichern gewonnenen Erfahrungswerte in der praktischen Anwendung von Reaktortechnologien zur AE, können Anwendung bei der Entwicklung und dem Bau von Pilotreaktoren zur Sequestrierung von biogenem CO_2 an Punktquellen finden. Die im Laborreaktor durchgeführten Experimente zur Wirtschaftlichkeit diverser (primär karbonatbasierter) Gesteins-/Mineralprodukte bilden dabei einen wesentlichen Anteil der Einschätzung der Anwendbarkeit von Reaktoren zur AE. Im Folgeprojekt RETAKE II sollen Versuche mit Pilotreaktoren mit Zugang zu CO_2-Quellen von Klärwerken im Küstenbereich wissenschaftlich begleitet werden.
Gemäß den gewonnenen Erfahrungen könnte für das Folgeprojekt RETAKE II der Laborreaktor der UHH an die zukünftigen Bedürfnisse angepasst und optimiert werden, sodass weitere Einsichten zu Anwendbarkeit und Funktion von Alkalinitätsreaktoren gewonnen werden können. Konkrete Vorhaben könnten hierbei die Optimierung des CO_2-Eingasungsprozesses für Gasströme mit niedrigen CO_2-Gehalten und damit verbessertem Minerallösungsverhaltens zur Erhöhung der Sequestrierungseffizienz sein. Eine Optimierung der Steuerung der Verweilzeiten von alkalischen Partikeln in den Reaktorzellen, sowie Verbesserung der notwendigen Messtechnik hierfür, sollte ebenfalls die Effizienz erhöhen. Allerdings sollten die Maßnahmen individuell für projektierte Reaktoren mit Pilotcharakter durchgeführt werden.
Die vom ZE durchgeführten Experimente und Analysen zur Stabilität der in die Umwelt eingebrachten Alkalinität, sowie die damit vergesellschafteten Verdünnungsexperimente finden im Bereich der Untersuchung der potentiellen Umwelteinflüsse Anwendung. Die erarbeiteten Resultate können hierbei zukünftig bspw. helfen obere Grenzwerte für die Einbringung von alkalischen Lösungen oder die Potentiale verschiedener aquatischer Systeme (Flüsse, Ozeane) besser einschätzen zu können. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vom GEOMAR, Hereon und AWI könnte hierbei auch in Zukunft fortgesetzt werden.

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

Keine

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

Kowalczyk, K., Amann, T., Strefler, J., Vorrath, M. E., Hartmann, J., De Marco, S., ... & Kriegler, E. (2024). Marine Carbon Dioxide Removal by alkalinization should no longer be overlooked. Environmental Research Letters. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5192

Suitner, N.; Hartmann, J.; Varliero, S.; Faucher, G.; Moras, C. A.; Suessle, P. (in prep.). Surface area and Ω-aragonite oversaturation as controls of the runaway precipitation process in ocean alkalinity enhancement

Lim, C.; Suitner, N.; Moras, C. A; Hartmann, J.; Faucher, G. (in prep.). Initial response of phytoplankton to ocean alkalinity enhancement

Suitner, N.; Hartmann, J.; Moras, C. A.; Faucher; G. (in prep). Dilution as a pivotal aspect in the prevention of runaway carbonate precipitation during OAE applications

Suitner et al. (in prep) Kinetics of limestone in a reactor for ocean alkalinization enhancement via riverine input

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

TEIL III - Erfolgskontrollbericht

RETAKE-I (Universität Hamburg)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger:	Universität Hamburg; Institut für Geologie; Fachbereich Erdsystemwissenschaften; Bundesstraße 55, 20146 Hamburg
Förderkennzeichen:	U4603BMB2102
Vorhabenbezeichnung:	DAM Dekarbonisierung - RETAKE: Quantifizierung der Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen atmosphärischer CO_2-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung (AE); sowie Kinetik und Nutzung neuer Materialien für die Ozeanalkalinisierung
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2021 – 31.07.2024
Autor:innen:	Niels Suitner E-Mail: niels.suitner@uni-hamburg.de
Datum:	20.12.2024

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Die in der eingehenden Darstellung (Teil II) angeführten Vorhaben des ZE zum Lösungsverhalten verschiedener Mineralprodukte, sowie die zahlreichern gewonnenen Erfahrungswerte in der praktischen Anwendung von Reaktortechnologien zur AE, konnten Anwendung bei der Entwicklung und dem Bau von Pilotreaktoren zur Sequestrierung von biogenem CO_2 an Punktquellen des Start-up-Unternehmens Planeteers GmbH finden. Die im Laborreaktor durchgeführten Experimente zur Wirtschaftlichkeit diverser (primär karbonatbasierter) Gesteins-/Mineralprodukte bilden dabei einen wesentlichen Anteil der Einschätzung der Anwendbarkeit von Reaktoren zur AE. Die Geschäftsidee der Planeteers GmbH gründet unmittelbar auf den erzeugten Ergebnissen des vom ZE entwickelten und angewendeten Laborreaktors. Der Technologietransfer wurde im Rahmen eines Dienstleistungsvertrages mit der Universität Hamburg durchgeführt. Im Folgeprojekt RETAKE II sollen die Versuche mit den Pilotreaktoren im Feld wissenschaftlich begleitet werden. Der momentane Fokus liegt hierbei bei der Sequestrierung von CO_2 aus Klär- und Faulgasen, welche in Klärwerken anfallen. Konkrete Projekte mit verschiedenen Generationen an Reaktoren befinden sich hierbei aktuell (Dez. 2024) in der Umsetzung.
Die vom ZE durchgeführten Experimente und Analysen zur Stabilität der in die Umwelt eingebrachten Alkalinität, sowie die damit vergesellschafteten Verdünnungsexperimente finden im Bereich der Untersuchung der potentiellen Umwelteinflüsse Anwendung. Die erarbeiteten Resultate können hierbei zukünftig bspw. helfen obere Grenzwerte für die Einbringung von alkalischen Lösungen oder die Potentiale verschiedener aquatischer Systeme (Flüsse, Ozeane) besser einschätzen zu können. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vom GEOMAR, Hereon und AWI könnte hierbei auch in Zukunft fortgesetzt werden.
Die technoökonomischen Abschätzungen für die Anwendung von AE-Szenarien auf dem offenen Ozean zeigten eine gangbare zukünftige Kostenentwicklung für die Sequestrierung von CO_2 bei der calziumhydroxidbasierten AE unter Verwendung von Schiffen. Basierend auf den in Kowalczyk et al. (2024) publizierten Annahmen, zeigen sich hierbei niedrigere Kosten im Vergleich zu anderen DACCS-Verfahren. Allerdings fehlen bislang Feldversuche, um die Berechnungen und die Validität der hinterlegten Annahmen bestätigen zu können. Da die technoökonomische Bewertung keine wesentlichen Hindernisse aufzeigte, sollten die zukünftigen Schwerpunkte der Forschung zu marinen Kohlenstoffentnahmestrategien verstärkt auf die Auswirkungen auf Ökosysteme, Governance sowie Monitoring, Berichterstattung und Verifizierung des aus der Atmosphäre gebundenen CO_2 ausgerichtet sein. Des Weiteren sollte der Fokus auf die Entwicklung und Evaluierung von Technologien zur marinen AE gelegt werden, um zu klären, ob die Anwendung karbonatbasierter Substanzen und anderer Materialien im Rahmen einer umfassenderen Strategie zur Kohlenstoffentnahme in Betracht gezogen werden sollte.

2. Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des Zuwendungsempfängers brauchen nicht offenbart zu werden):

2.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten

Es werden keine wirtschaftlichen Verwertungen von Seiten der Universität Hamburg mit Bezug auf dieses Projekt angestrebt. Es wurden keine Schutzrechte/Lizenzen gemacht oder in Anspruch genommen.

2.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen / -industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien

Es werden keine wirtschaftlichen Verwertungen von Seiten der Universität Hamburg mit Bezug auf dieses Projekt angestrebt. Über den Technologie- und Erkenntnistransfer mit der Planeteers GmbH, könnten in Zukunft bei einer serienmäßigen und hochskalierten Anwendung der Reaktortechnologie die CO_2-Emissionen von Klärwerken oder ähnlichen Anlagen mit CO_2-haltigem Abgasstrom reduziert werden. Für einen wirtschaftlichen Erfolg wird allerdings eine signifikante Weiterentwicklung des Labor-Reaktoransatzes notwendig sein.

2.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

Die Ergebnisse aus RETAKE I dienten als Grundlage für eine Fortführung in einer anderen Konstellation von Projektpartnern. Die Firma Planeteers GmbH hat in der Zwischenzeit einen größeren und mobilen Pilotreaktor konstruiert, der ein CO_2-Sequestierungspotential von circa 60 Tonnen CO_2 pro Jahr aufweist. Dieser wird aktuell (Dez. 2024) an ausgewählten Klärwerken mit Punktquellen für biogenes CO_2 getestet. Im Rahmen von RETAKE II sollen die Alkalinitätsänderungen in den Kläranlagen des Hamburger Umlands erfasst werden und eine Basislinie für die geochemisch machbaren AE in der Elbe detaillierter herausgearbeitet werden.

2.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Im Rahmen von RETAKE II werden die MRV-Konzepte für eine Einleitung von alkalinisierten Wässern in die Umwelt getestet. Hierfür sollen die saisonalen Variationen der chemischen Parameter der Elbe analysiert werden. Für die Untersuchungen werden das Einleitungswasser sowie die Anlagen des Klärwerks Hetlingen als Versuchsobjekte herangezogen.

3. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund der Limitierungen des errichteten Laborreaktors gelang es nur 100% CO_2-Gas-Abgasströme zu testen. Budgetbeschränkungen erlaubten es nicht in der ersten Projektphase die notwendige Einrichtung einer Stickstoffentgasung zu realisieren. Dies soll in RETAKE II umgesetzt werden, sodass auch Mischgase, welche typisch für Biogasanlagen oder der Klärschlammverbrennung sind, simuliert werden können. Hierfür sind jedoch ingenieurtechnische Planungen und Anpassungen notwendig.

4. Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Das Projekt wurde im Zeitplan durchgeführt und abgeschlossen. Die Auswertung erfolgt zum Teil nach Abschluss des Projektes.