



Sachbericht zum Verwendungsnachweis TEIL I - Kurzbericht

RETAK-I (Universität Bremen)
August 2021 - Juli 2024

Zuwendungsempfänger: Universität Bremen

Förderkennzeichen: 03F0895H

Vorhabenbezeichnung: Alkalinitätserhöhung im Experiment und dem
offenen Ozean

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 - 31.07.2024

Autor:innen

Prof. Wolfgang Bach

Dr. Reiner Steinfeldt

Datum 20.12.2024



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

AP0.4 (Datenmanagement)

Im Rahmen des Datenmanagements sollte eine Übersicht über alle in RETAKE gewonnenen Daten erstellt und die zugehörigen Metadaten werden. Die Publikation der Daten sollte sicher gestellt werden.

AP1.3

Übergreifendes Ziel der experimentellen Arbeiten in T1.3 war die empirische Ermittlung möglicher Nutzen und Risiken, die mit der Alkalinitätserhöhung (AE) in hochenergetischen Küstenumgebungen verbunden sind. Es sollten (1) die Auflösungskinetik von Basalt und Olivin ortsaufgelöst mit mikroskopischen Methoden in durchlässigen Ablagerungsmilieus empirisch bestimmt werden, und (2) die sekundäre Mineralbildung untersucht werden, um potenzielle Senken der Reaktionsprodukte von Basalt- und Olivin-Verwitterung abzuschätzen

AP3.1

Dieses Teilprojekt befasste sich mit der Alkalinitätserhöhung im offenen Ozean. Es wurden verschiedene beispielhafte Regionen (Tiefenwasserbildungsgebiet, Auftriebsgebiet) im Hinblick auf die Effektivität der Alkalinitätserhöhung (Verhältnis von im Ozean ausgebrachter Alkalinität zum zusätzlich vom Ozean aufgenommenen Kohlenstoff) untersucht. Außerdem wurde die Änderung der Alkalinitäts- und Kohlenstoffkonzentration sowohl an der Oberfläche als auch im Ozeaninneren in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Alkalinisierung abgeschätzt und mit der natürlichen Variabilität dieser Konzentrationen verglichen. Dabei konnte auf die Erfahrung bei der Erstellung des GLODAP-Datensatzes (Lauvset et al. 2024) aufgebaut werden. Für die Effektivität der Alkalinitätserhöhung gab es Studien mit Ozeanzirkulationsmodellen, die allerdings die Ursachen der regional unterschiedlichen Effektivität nicht hinreichend erklären können (z.B. Burt et al., 2021).

2. Ablauf des Vorhabens

AP0.4

Nach Fertigstellung einer gemeinsamen ‚data policy‘ für alle CDRmare Konsortia in Zusammenarbeit mit dem zentralen Datenmanagement wurde der Datenmanagementplan erarbeitet. Dieser enthält die im Verbundantrag aufgelisteten Datensätze, die im Laufe des Projektes erstellt werden sollten, ebenso eine Übersicht über alle geplanten

Expeditionen, Experimente und Modellläufe. Die Metadaten dazu sind, soweit möglich, in OSIS (Ocean Science Information System, <https://portal/geomar.de/metadata>) eingegeben worden. Im Laufe des Projektes ist der Datenmanagementplan aktualisiert und mit Angabe der DOI für die publizierten Datensätze ergänzt worden.

AP1.3

Im Berichtszeitraum wurde die stoffliche Charakterisierung des ultramafischen Ausgangsmaterials (Dunit der Firma Sibelco), das in allen Experimenten im Rahmen von RETAKE verwendet wird, mittels der Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMPA) abgeschlossen. Die sehr aufwendige Präparation der Proben für die mikroskopischen Messungen der Auflösungsraten mittels Vertical Scanning Interferometrie (VSI) wurde mehrfach getestet, nachdem erste Präparate sich bei Testmessungen als ungeeignet erwiesen hatten. Zwar konnte die Oberfläche erfolgreich optisch abgetastet werden, die vertikale Auflösung erlaubt aber keine verlässliche Erhebung der Raten, mit denen die Oberflächen bedingt durch Auflösung zurückgingen. Die Ermittlung der Auflösungsraten mittels der neuartigen Röntgenmikroskopie hat bei den Experimenten trotz Laufzeiten von einigen Monaten keine messbaren auflösungsbedingten Verlagerungen der Korngrenzen gezeigt. Somit konnten die weiteren Meilensteine nicht erfüllt werden.

AP3.1

Die Effektivität der Alkalinitätserhöhung (AE) für verschiedene Regionen ist mit einem einfachen neu entwickelten Boxmodell bestimmt worden. Dabei wurden die Modellparameter (Tiefe der durchmischten Schicht, Gastranfergeschwindigkeit, Export) variiert, um deren Einfluss auf die Effektivität der AE zu ermitteln. Zum Vergleich der Änderung der Kohlenstoffvariablen infolge von AE mit der natürlichen Variabilität dieser Größen wurden die entsprechenden Daten aus dem GLODAP-Datenprodukt (Lauvset et al., 2024) verwendet. Um die Auswirkungen von AE im Ozeaninneren abzuschätzen, wurden die Oberflächenwerte aus dem Boxmodell mit Greensfunktionen aus der TMI (total matrix inversion) Methode (Gebbie und Huybers, 2012) in die tieferen Schichten propagiert. Zuletzt wurde mit Hilfe des Boxmodells die Effektivität von AE entlang von drei Schifffahrtsrouten im Atlantik bestimmt.

3. Wesentliche Ergebnisse

AP1.3

Es zeigt sich, dass der Sibelco-Dunit (per Definition zu >95% aus Olivin bestehend) erhebliche Anteile von Amphibol, Glimmer, Granat, und Chlorite, neben Orthopyroxen und Serpentin enthält. Untersuchungen mit der Röntgenpulverdiffraktometrie belegen, dass dieses Gestein nur zu ca. 72% aus Olivin besteht. Jeweils 8% werden von Orthopyroxen und Serpentin ausgemacht. Chlorit macht 6% aus, während 4% des Gesteins aus Amphibol bestehen. Die Messungen der Auflösungsraten dieser Minerale sowie die von Basaltglas konnten nicht erfolgreich durchgeführt werden.

AP3.1

Die verschiedenen untersuchten Regionen zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Effektivität von AE. Diese nimmt im Wesentlichen mit der Tiefe der durchmischten Schicht ab und mit der Gastransfergeschwindigkeit zu. Deswegen haben die tropische Auftriebsregion und das Gebiet im Südatlantik die höchste Effektivität von AE. Der Nachteil an AE in Auftriebsgebieten ist allerdings, dass sich dort die Alkalinitätskonzentration im Laufe der Zeit stark erhöht, was negative Auswirkungen auf das Ökosystem haben kann. Wird AE nur in Monaten mit flacher durchmischter Schicht durchgeführt, erhöht sich die Effektivität von AE, und der Unterschied zwischen den Regionen verringert sich. Der Vergleich der Änderung der Kohlenstoffvariablen durch AE mit der natürlichen Variabilität ergibt, dass an der Oberfläche nach einigen Jahren die Alkalinität deutlich erhöht ist, mit Ausnahme der Tiefenwasserbildungsregion im Nordatlantik. Bei Kohlenstoff (DIC) ist die natürliche Variabilität höher als bei der Alkalinität, die Änderung durch AE aber geringer, wodurch sich nur im tropischen Auftriebsgebiet eine signifikante Zunahme ergibt. Im Ozeaninneren ist auch nach 25 Jahren die Änderung im Kohlenstoff kaum gegenüber der natürlichen Variabilität nachweisbar.

Literatur

Burt, D. J., Fröb, F. and Ilyina, T.: The Sensitivity of the Marine Carbonate System to Regional Ocean Alkalinity Enhancement, *Front. Clim.* 3:624075, doi: 10.3389/fclim.2021.624075, 2021.

Gebbie, G. und Huybers, P.: The Mean Age of Ocean Waters Inferred from Radiocarbon Observations: Sensitivity to Surface Sources and Accounting for Mixing Histories, *J. Phys. Oceanogr.*, 42(2), 291-305, <https://doi.org/JPO-D-11-043.1>, 2012.

Lauvset, S. K., Lange, N., Tanhua, T., Bittig, H. C., Olsen, A., Kozyr, Álvarez, M., Azetsu-Scott, A., Brown, P. J., Carter, B. R., da Cunha, L. C., Hoppema, M., Humphreys, M. P., Ishii, M., Jeansson, E., Murata, A., Müller, J. D., Pérez, F. F., Schirnick, C., Steinfeldt, R., Suzuki, T., Ulfso, A., Velo, A., Woosley, R. J., und Key. R.: The annual update GLODAPv2.2023: the global interior ocean biogeochemical data product, *Earth Syst. Sci. Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2023-468>, 2024.



Sachbericht zum Verwendungsnachweis TEIL II - Eingehende Darstellung

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

Zuwendungsempfänger: Universität Bremen

Förderkennzeichen: 03F0895H

Vorhabenbezeichnung: Alkalinitätserhöhung im Experiment und dem
offenen Ozean

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 - 31.07.2024

Autor:innen

Prof. Wolfgang Bach

Dr. Reiner Steinfeldt

Datum 20.12.2024



1. Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen

AP0.4

In Zusammenarbeit mit dem zentralen Datenmanagement und den Datenmanager:innen der anderen CDRmare Konsortia ist eine gemeinsame data policy erarbeitet worden. Für RETAKE wurde ein Datenmanagementplan mit einer Übersicht über alle im Projekt erhobenen Daten sowie eine Übersicht über Expeditionen, Experimente und Modellläufe erstellt. Die Metadaten hierzu sind in OSIS (Ocean Science Information System, <https://portal.geomar.de/metadata>) öffentlich zugänglich.

AP1.3

Die in AP1.3 durchgeführten Arbeiten umfassen die chemische und mineralogische Charakterisierung des Dunit der Firma Sibelco, der bei allen experimentellen Arbeiten in RETAKE als Ausgangsmaterial eingesetzt werden konnte. Es zeigt sich, dass dieser Dunit (per Definition zu >95% aus Olivin bestehend) erhebliche Anteile von Amphibol, Glimmer, Granat, und Chlorite, neben Orthopyroxen und Serpentin enthält (Tabelle 1). Das Material wurde daraufhin auch mittels Röntgenpulverdiffraktometrie charakterisiert. Laut Ergebnissen der Röntgenbeugungsmessungen besteht der „Dunit“ nur zu ca. 72% aus Olivin. Jeweils 8% werden von Orthopyroxen und Serpentin ausgemacht. Chlorit macht 6% aus, während 4% des Gesteins aus Amphibol bestehen.

Die Auflösungsraten des Olivins aus diesem Dunit und der weiteren Minerale dieses Gesteins sowie die Auflösungsraten von Basaltglas sollten bestimmt werden. Der gewählte methodische Ansatz mit transparenten Durchflusszellen und VSI- und AFM-Messungen funktioniert prinzipiell, aber die Auflösung war nicht ausreichend, um angesichts der sehr geringen Auslösungsraten eine Quantifizierung der Raten zu ermöglichen. Auch ein achtmonatiges Auflösungs experiment lief eine Ermittlung der Auflösungsraten nicht zu. Die Ermittlung der Auflösungsraten mittels der neuartigen Röntgenmikroskopie hat bei diesen Experimenten ebenfalls keine messbaren auflösungsbedingten Verlagerungen der Korngrenzen gezeigt.

Ein nicht vorhersehbares Problem bei dem Langzeitexperiment war, dass Einbettungsmedium (ein Epoxidharz) und Experimentalfluid unter

Volumenzunahme reagiert hatten und sich damit die Position der Mineralkörner veränderte. Diese Veränderung der Topographie hatte dazu geführt, dass die Mineralkörner im Durchflussgang nicht mehr mit den Referenzkörnern, die während des Experiments abgedeckt waren, in Bezug gebracht werden konnten. Auch hat sich auch die Lage der Oberflächen der Mineralkörner hinsichtlich des Substrates verändert (Verkipfung). Somit war es lediglich möglich, die Intrakornauflösung zu quantifizieren. Ein Vergleich zwischen den Differenzen von Referenzkörnern (die nicht der Experimentallösung ausgesetzt waren) und den Körnern im Durchflussgang hat ergeben, dass die Auflösung von Olivin nicht zu detektieren war. Der Mittelwert der Oberflächenveränderung liegt exakt bei 0 und die Abweichungen nach oben und unten bilden die Messgenauigkeit ab. Wir konnten somit feststellen, dass die Auflösungsrate in unserem Experiment kleiner als $3 \cdot 10^{-15}$ mol/(cm²*s) war. Diese Auflösungsrate ist eine Größenordnung geringer als veröffentlichte Werte aus Batch-Rührexperimenten ($1 \cdot 10^{-14}$ -bis $5 \cdot 10^{-14}$ mol/(cm²*s)) für die Auflösung von Forsterit bei 25°C und einem pH-Wert von 8 (Oelkers et al. 2018). Dieser Unterschied könnte darauf hinweisen, dass die mechanische Agitation der Körner in den Batch-Rührexperimenten die Auflösungsraten erhöht.

AP3.1

Die bereit gestellten Mittel sind im wesentlichen für wissenschaftliches Personal eingesetzt worden. Ziel dieses Teilprojektes war die Abschätzung der Effektivität von Alkalinitätserhöhung (AE), d.h. die durch eine bestimmte Menge an zugeführter Alkalinität hervorgerufene CO₂ Aufnahme des Ozeans, zu bestimmen. Außerdem wurde die Änderung der Kohlenstoffvariablen infolge AE mit der natürlichen Variabilität verglichen.

Die Effektivität von AE ist für verschiedene Regionen ermittelt worden. Dazu wurden Gebiete im Atlantik ausgewählt (Abb. 1), die sich im Hinblick auf die Saisonalität der Kohlenstoffvariablen und der Tiefe der durchmischten Schicht unterscheiden (z.B. geringe Deckschichttiefe im äquatorialen Auftriebsgebiet, tief reichende Vermischung im subpolaren Nordatlantik im Winter). Außerdem wurde die Effektivität von AE entlang von drei typischen Scyhiffahrtsrouten bestimmt (Abb. 1).

Zur Bestimmung der Effektivität von AE wird ein selbst entwickeltes Boxmodell verwendet. Alkalinität wird in der oberen, durchmischten Schicht zugeführt. Dadurch ändert sich der CO₂ Partialdruck und der CO₂ Fluss zwischen Ozean und Atmosphäre und infolgedessen auch die

CO₂ Konzentration im Ozean. Bei Vertiefung der durchmischten Schicht wird die zugeführte Alkalinität und auch das CO₂ mit dem Wasser darunter verdünnt. Bei Verringerung der Tiefe der durchmischten Schicht verbleibt ein entsprechender Teil der zugeführten Alkalinität und des CO₂ in der Schicht darunter. Dieser Teil verbleibt zu einem bestimmten Anteil in der tieferen Schicht und kann bei der nächsten Vertiefung der Deckschicht wieder in diese eingetragen werden. Der verbliebene Anteil wird exportiert. Als Parameter benötigt das Modell

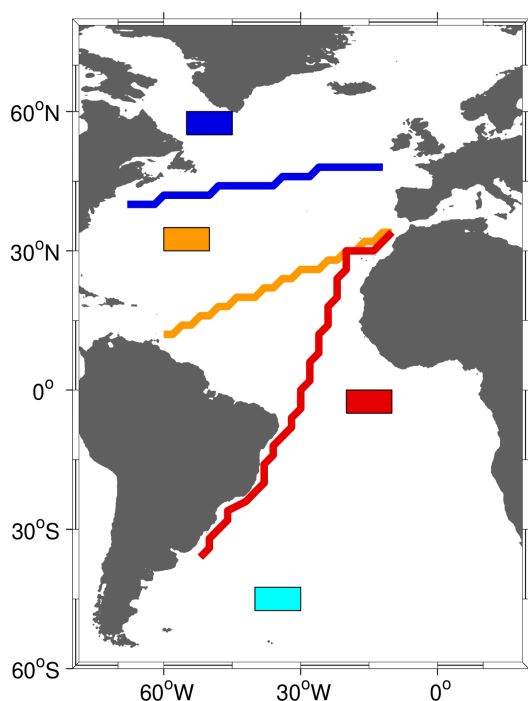


Abb.1: Regionen und Schiffsrouten, für die die Änderung der ozeanischen CO₂-Aufnahme durch Alkalinisierung untersucht werden sollen.

Blau: subpolarer Nordatlantik (SP), orange: subtropischer Nordatlantik (ST), rot: tropischer Atlantik (T), cyan: südlicher Ozean (SO).

Temperatur, Salzgehalt, Alkalinität, Tiefe der durchmischten Schicht, Gastransfargeschwindigkeit, CO₂ Partialdruck und Gesamtkohlenstoff im Ozean. Diese Größen sind aus Datenprodukten (Guinehut et al., (2012), Landschützer et al. (2020)) bestimmt worden (Abb. 2).

Mit dem Boxmodell sind zahlreiche Modellläufe zur Bestimmung der Effektivität von AE durchgeführt worden. Jeder Lauf umfasst 26 Jahre, von 1993 bis 2019. Für diesen Zeitraum liegen die erforderlichen Größen aus den Datenprodukten vor. Die Standardläufe erfolgten mit den Mittelwerten der physikalischen Größen über die vier Regionen. Außerdem wurden Modellläufe mit den Extremwerten (Minimum und Maximum zu jedem Zeitpunkt über die Region) für die Tiefe der durchmischten Schicht und der Gastransfargeschwindigkeit durchgeführt. Die zugeführte Alkalinität beträgt $0.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Global angewendet, würde dies einer jährliche Alkalinitätserhöhung von 0.25

Pmol entsprechen. In weiteren Modellläufen wurden der atmosphärische CO_2 Gehalt und die zugeführte Alkalinität variiert. Weitere Modellexperimente umfassen das Szenario von Alkalinitätserhöhung während eines bestimmten Monats.

In Abb.3 sind die Ergebnisse für die Variation der Gastransfergeschwindigkeit und der Tiefe der durchmischten Schicht dargestellt. Je geringer die Gastransfergeschwindigkeit und je tiefer die durchmischte Schicht, umso geringer ist die Effektivität der Alkalinisierung. Offenbar geht ein Teil der zugeführten Alkalinität unterhalb der durchmischten Schicht ‚verloren‘, bevor der Ozean die maximal mögliche Menge an

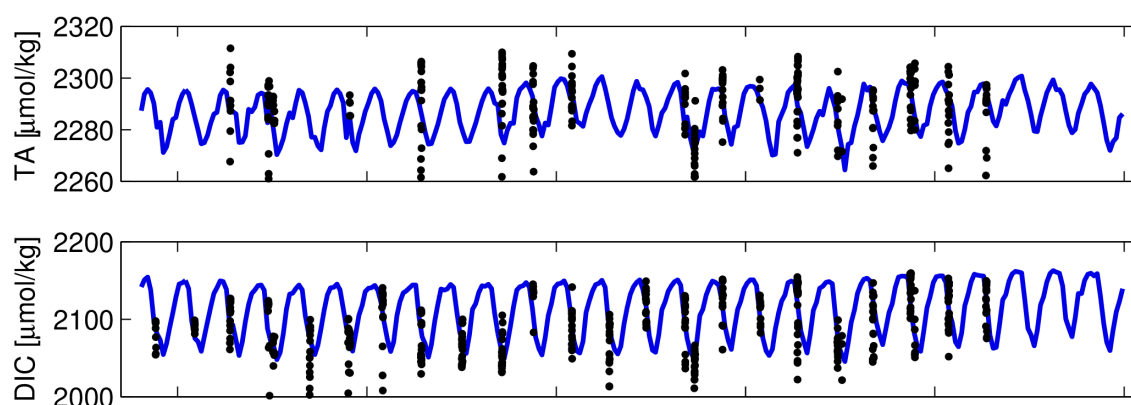


Abb. 2: Zeitreihe von Alkalinität (TA) und Kohlenstoffs (DIC) in der Oberflächenschicht für die subpolare Region aus Abb. 1. Zum Vergleich sind direkte Messwerte aus GLODAPv2.2023 für die betreffenden Regionen als schwarze Punkte dargestellt.

CO_2 aufgenommen hat. Je höher die Gastransfergeschwindigkeit und je flacher die ozeanische Deckschicht, umso besser kann das Maximum der CO_2 Aufnahme erreicht werden. Wenn die ‚ungenutzte‘ Alkalinität unterhalb der durchmischten Schicht bei ihrer Vertiefung wieder eingetragen wird, kann sie wieder zur CO_2 Aufnahme beitragen. Somit erhöht sich die Effizienz der Alkalinisierung. In Abb. 3 sind die Ergebnisse für die Fälle gezeigt, bei denen 0, 50% und 100% der in die tiefere Schicht eingetragenen Alkalinität und des Kohlenstoffs exportiert werden. Der Fall mit 50% Export wird als ‚Standardfall‘ angenommen und findet für alle folgenden Abbildungen Anwendung.

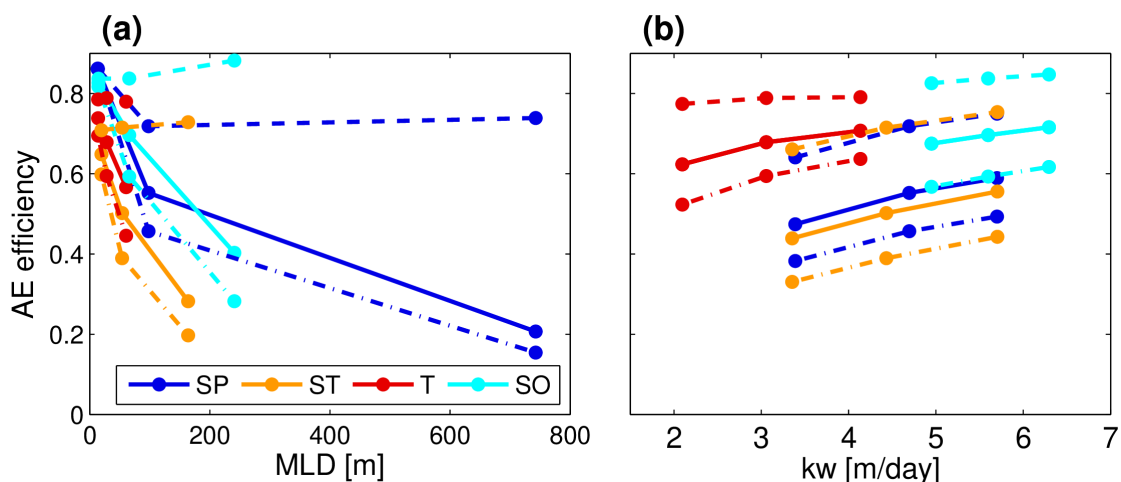


Abb.3: Effizienz von AE als Funktion der Tiefe der durchmischten Schicht (a) und der Gastransfargeschwindigkeit (b) für die vier ausgewählte Regionen im Atlantik (Subpolar (SP), Subtropen (ST), Tropen (T), und südlicher Ozean (SO)). Gestrichelte/durchgezogene/strich-punktierte Linien: 0%/ 50%/ 100% Export aus der tieferen Schicht.

Abb. 4 zeigt die Effizienz von AE, wenn diese nur in einem bestimmten Monat des Jahres durchgeführt wird. Auch hier wird wieder Einfluss der Deckschichttiefe auf die Effizienz erkennbar: In den jeweiligen Sommermonaten ist die durchmischte Schicht flach, und die Effizienz

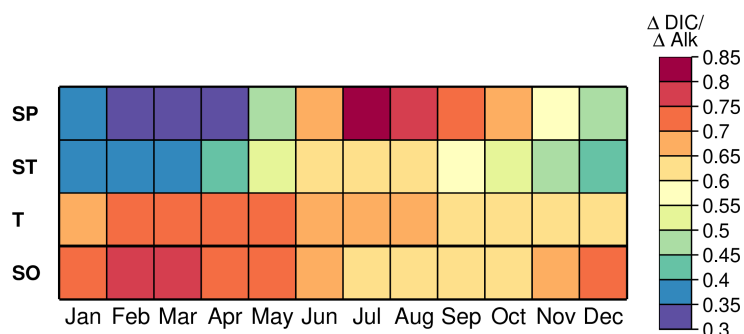


Abb.4: Effizienz von AE für Alkalinitätszugabe nur in einem bestimmten Monat für die vier Modellregionen SP, ST, T und SO.

von AE am höchsten. Wird AE nur in den jeweils effektivsten Monaten durchgeführt, ist der Unterschied zwischen den Regionen relativ gering. Die Effektivität von AE entlang der 3 Schifffahrtsrouten ist in Abb. 5 dargestellt, wiederum für AE während eines bestimmten Monats als auch für kontinuierliche AE.

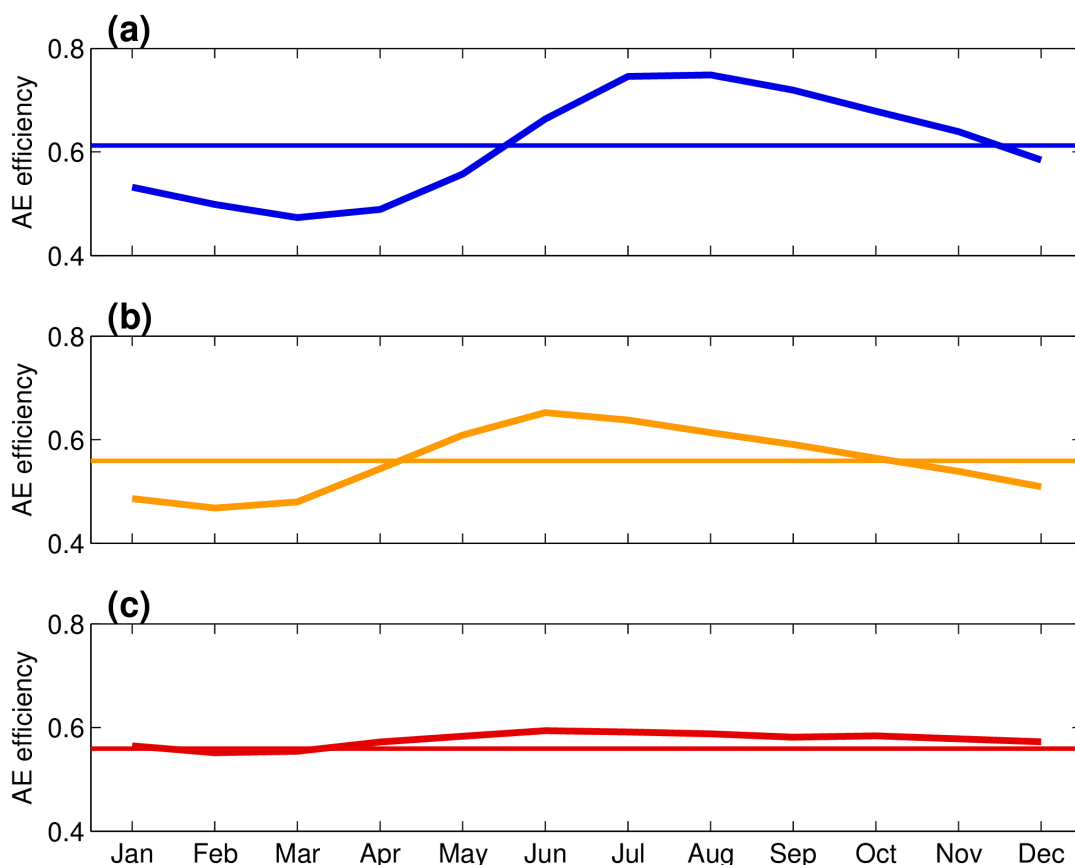


Abb. 5: Effizienz von AE entlang der drei Schiffsrouten in Abb. 1 für monatliche (dicke Linien) und permanente (dünnen Linien) Alkalinitätszugabe.

Die natürliche Variabilität der Kohlenstoffvariablen DIC (dissolved inorganic carbon) und TA (total alkalinity) ist für den Bereich des gesamten Atlantik durchgeführt worden. Als Grundlage dient dabei das Datenprodukt GLODAPv2.2023 (Lauvset et al., 2024). Dafür sind die DIC und TA Daten aus GLODAPv2.2024 in Dekaden zusammengefasst, auf ein $0.25^\circ \times 0.5^\circ$ Gitter interpoliert worden. Die Variabilität ist dann aus der räumlichen Standardabweichung der gegitterten Werte innerhalb der größeren Boxen und der dekadischen zeitlichen Änderung der Mittelwerte innerhalb von $2^\circ \times 2^\circ$ sowie zum Vergleich $5^\circ \times 5^\circ$ Boxen bestimmt worden. Dabei ist die Variabilität in den größeren Boxen um etwa 20% erhöht. Alle hier gezeigten Werte sind für die $2^\circ \times 2^\circ$ Boxen berechnet. Für die Oberfläche ist die Variabilität von TCO_2 und Alk zusätzlich aus den Eingangsdaten des Boxmodells bestimmt worden (basierend auf Guinehut et al., 2012, und Landschützer et al., 2020). Diese liegen in monatlicher Auflösung auf einem $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ Gitter vor. Auch hier ist die Variabilität als Summe der räumlichen und zeitlichen Standardabweichung bestimmt worden, wobei der mittlere

Jahresgang hereausgerechnet wurde. Abb. 6 zeigt diese Variabilität im

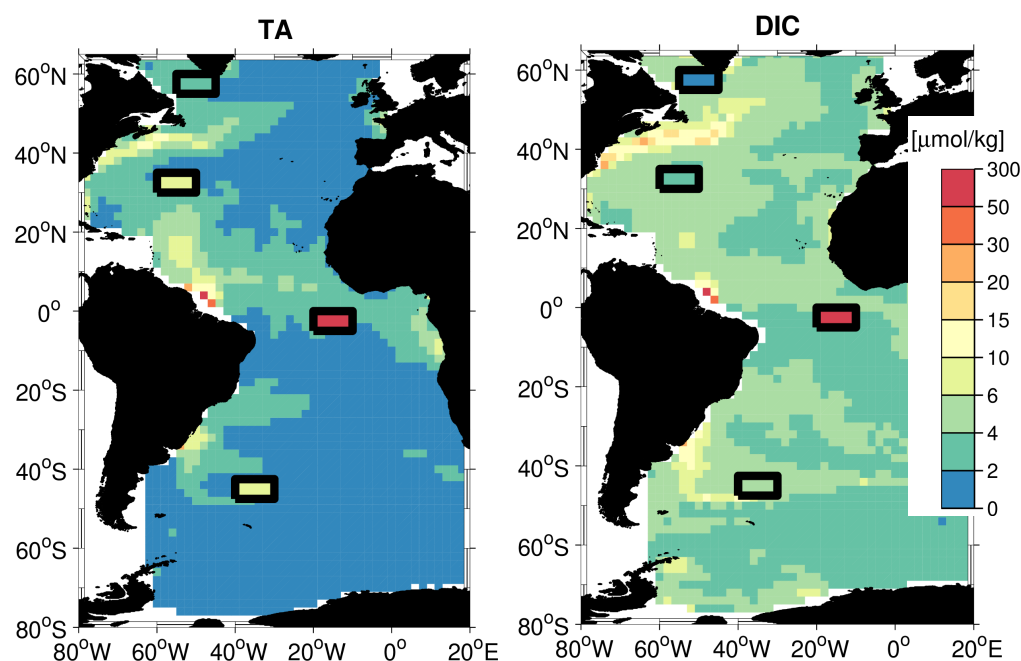


Abb. 6: Natürliche Variabilität von Oberflächenalkalinität (TA, links) und Kohlenstoff (DIC, rechts). Die Werte in den dick umrandeten Rechtecken zeigen die aus dem Boxmodell errechnete Zunahme von TA und DIC nach 25 Jahren Alkalinisierung mit einer Rate von $0.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

Vergleich zu der Erhöhung von TA und DIC durch AE in den vier untersuchten Regionen. Dabei ist die natürliche Variabilität von DIC größer als von TA, während das AE Signal für TA größer ist (da die Effektivität von AE stets kleiner ist als eins). Auch nach 25 Jahren AE ist nur im tropischen Auftriebsgebiet die durch AE hervorgerufene Zunahme von TA und DIC deutlich größer als die natürliche Variabilität.

Die Variabilität von DIC im Ozean wird auch durch Änderungen im remineralisierten Kohlenstoff beeinflusst, ebenso wie durch die zeitliche Zunahme des Eintrages an anthropogenem Kohlenstoff. Um dies zu berücksichtigen, sind die Werte der Sauerstoffzehrung (AOU, apparent oxygen utilization) und von anthropogenem Kohlenstoff an jedem Daten- bzw. Gitterpunkt bestimmt worden. Die Konzentration an anthropogenem Kohlenstoff wird dabei über Altersverteilungen (transit time distributions) bestimmt, welche wiederum aus anthropogenen Tracerdaten (FCKWs und SF6, ebenfalls aus GLODAPv2.2024) abgeleitet werden können (Steinfeldt et al. 2024). Aus der Sauerstoffzehrung und dem Redfieldverhältnis lässt sich die Menge an remineralisiertem Kohlenstoff ermitteln. Dieser Wert wird, ebenso wie der

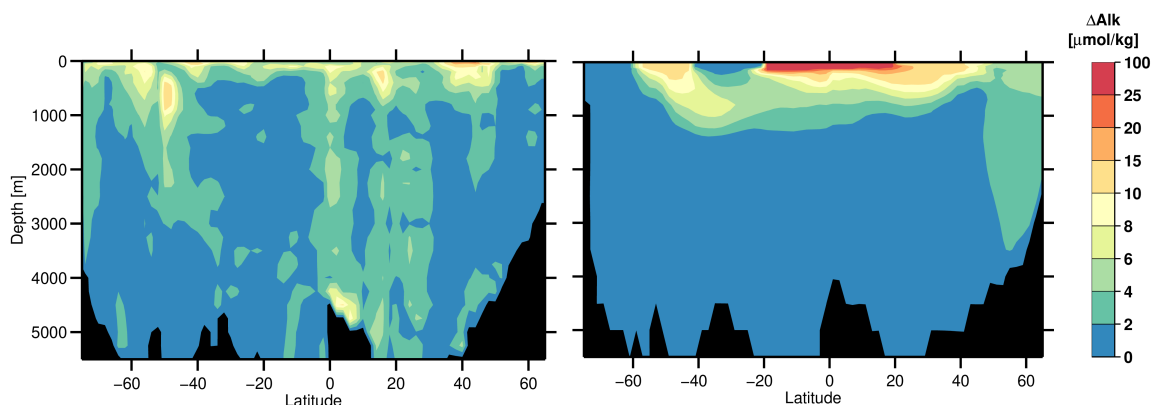


Abb. 7: Links: Variabilität von TA aus gegitterten GLODAP Daten. Rechts: Mithilfe von Greensfunktionen aus der TMI Methode berechneter Anstieg von TA nach 25 Jahren Alkalinisierung mit einer Rate von $0.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

Kohlenstoff, von der DIC-Konzentration abgezogen. Von diesen ‚bereinigten‘ DIC-Werten ist dann die Variabilität auf dieselbe Weise wie für das ursprüngliche DIC bestimmt worden. Dabei zeigt sich, wie erwartet, eine deutliche Verringerung der Variabilität.

Die Ausbreitung der erhöhten Werte von Alkalinität und Kohlenstoff infolge von AE im Ozeaninneren wird mithilfe von Greensfunktionen bestimmt. Diese Greensfunktionen in $2^\circ \times 2^\circ$ Auflösung sind nach der ‚total matrix intercomparison‘ Methode bestimmt worden (Gebbie und Huybers, 2012) und sind frei zugänglich (<https://github.com/ggebbie/TMI> (Gebbie et al., 2012)). Abb. 7 zeigt die Variabilität von TA, zonal gemittelt über den Westatlantik. Im Vergleich dazu ist die mithilfe der Greensfunktionen ermittelte Zunahme von TA nach 25 Jahren AE dargestellt. Dabei ist davon ausgegangen worden, dass AE über die gesamten vier Regionen (subpolarer Nordatlantik, nördliche Subtropen, Tropen und südlicher Ozean Sektor) Atlantik erfolgt, die deutlich größer sind als die vier Boxen aus diesen Regionen in Abb. 1. In einigen Bereichen ist nicht nur Nahe der Oberfläche, sondern auch in größeren Tiefen der Anstieg von TA höher als die natürliche Variabilität, z.B. im Nordatlantik. Für DIC gilt dies allerdings i.d.R. nicht. Gerade hier wäre aber ein eindeutiges Signal wünschenswert, um beurteilen zu können, ob AE tatsächlich zu einer erhöhten CO_2 Aufnahme des Ozeans geführt hat.

Literatur

Gebbie, G. und Huybers, P.: The Mean Age of Ocean Waters Inferred from Radiocarbon Observations: Sensitivity to Surface Sources and

Accounting for Mixing Histories, *J. Phys. Oceanogr.*, 42(2), 291-305, <https://doi.org/JPO-D-11-043.1>, 2012.

Guinehut, S., A.-L. Dhomps, G. Larnicol and P.-Y. Le Traon, 2012: High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. *Ocean Sci.*, 8, 845-857, doi:10.5194/os-8-845-2012.

Landschützer, P., N. Gruber and D.C.E. Bakker (2020). An observation-based global monthly gridded sea surface pCO₂ and air-sea CO₂ flux product from 1982 onward and its monthly climatology (NCEI Accession 0160558). Version 6.6. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset.

Lauvset, S. K., Lange, N., Tanhua, T., Bittig, H. C., Olsen, A., Kozyr, Álvarez, M., Azetsu-Scott, A., Brown, P. J., Carter, B. R., da Cunha, L. C., Hoppema, M., Humphreys, M. P., Ishii, M., Jeansson, E., Murata, A., Müller, J. D., Pérez, F. F., Schirnick, C., Steinfeldt, R., Suzuki, T., Ulfso, A., Velo, A., Woosley, R. J., und Key. R.: The annual update GLODAPv2.2023: the global interior ocean biogeochemical data product, *Earth Syst. Sci. Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2023-468>, 2024.

Steinfeldt, R., Rhein, M. und Kieke, D.: Anthropogenic carbon storage and its decadal changes in the Atlantic between 1990–2020, *Biogeosciences*, 21, 3839–3867, doi:10.5194/bg-21-3839-2024, 2024.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

AP1.3

Mikrosondenmessungen und Material für die AFM-Messungen

AP0.4 und AP3.1

Die im Projekt beantragten Mittel wurden wie geplant eingesetzt. Dies sind im Wesentlichen die Personalmittel (30 Monate Dr. Reiner Steinfeldt für die wissenschaftliche Analyse, 6 Monate für das Datenmanagement).

Die in diesem Teilprojekt erzielten Ergebnisse wurden auf den CDRmare und RETAKE-Jahrestreffen präsentiert. Diese Kongressreisen wurden wie vorgesehen mit Projektmitteln finanziert.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Bestimmung der Auflösungsraten von Mineralen in Batch-Röhrexperimenten erlaubt die Betrachtung der orts aufgelösten Kinetik der Mineralauflösung nicht. Dafür wurden optisch-mikroskopische und röntgenmikroskopische Verfahren getestet, die allerdings nicht erfolgreich waren. Dennoch war der Versuch, über orts aufgelöste Ratenmessungen Aussagen über die mikroskopische Kinetik bei der Mineralauflösung machen zu können, sinnvoll, denn durch die Anwendung der klassischen Kinetik (makroskopisch) lassen sich vorhersagekräftige Modelle zur Alkalinitätsproduktion in AE-Szenarien nur schwerlich umsetzen.

Um die wissenschaftlichen Fragestellungen in angemessener Zeit erfolgreich bearbeiten zu können sowie für die Interpretation der Ergebnisse, war die Beschäftigung von erfahrenen Wissenschaftlers (Postdoktoranden) im beantragten Umfang erforderlich.

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

AP1.3

nsgesamt lässt sich feststellen, dass die mikroskopische Detektion von Mineralauflösungsraten mit dem gewählten experimentellen Ansatz nicht verlässlich durchzuführen ist. Daher wird dieses Projekt in der zweiten Phase von RETAKE nicht fortgesetzt.

AP3.1

Die geplanten Arbeiten in dem Nachfolgeprojekt RETAKE-II bauen direkt auf den hier vorgestellten Ergebnissen auf. Außerdem können die Resultate zur Planung von Monitoringmaßnahmen zur Verifikation der Wirksamkeit von Alkalinitätserhöhzng herangezogen werden.

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

In TP3.2 von RETAKE ist ebenfalls die Effektivität von AE abgeschätzt worden, allerdings mithilfe eine Klimamodells. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind dort allerdings geringer als in dem hier verwendeten Boxmodell.

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

Eine Veröffentlichung über die Effektivität von Ozeanalkalinisierung in dem hier vorgestellten Boxmodell wird Anfang 2025 eingereicht. Die ebenfalls geplante Veröffentlichung über die Variabilität der Kohlenstoffvariablen und mögliche Detektierbarkeit von AE wird erst am Ende der zweiten Projektphase erfolgen. Dies hat 2 Gründe: Zum Einen ist in RETAKE-I nur der Atlantik untersucht worden, in RETAKE-II werden diese Analysen auf den gesamten Ozean ausgedehnt. Zwei Veröffentlichungen mit demselben Inhalt, einmal nur für den Atlantik, einmal nur für den indischen und pazifischen Ozean erscheint nicht sinnvoll. Zum Anderen wird gerade eine neue Version des GLODAP-Datenproduktes erstellt (GLODAPv3). Möglicherweise verbessert sich dadurch die Konsistenz insbesondere der TA und DIC Daten, was eine Veränderung in der Abschätzung der natürlichen Variabilität zur Folge hätte.