

Earth System Knowledge Platform - die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft, www.eskp.de

Klimawandel · Ozeanografie

ALKALINITÄT - DIE UNTERSCHÄTZTE KÖCHIN IN DER „KLIMAKÜCHE OZEAN“

Christiane Eschenbach¹

¹ Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG)

Zuerst publiziert: 14. Dezember 2020, 7. Jahrgang

Digitaler Objektbezeichner (DOI): <https://doi.org/10.2312/eskp.053>

Teaser

Die Fähigkeit der Ozeane, atmosphärisches CO₂ aufzunehmen, ist essentiell für die Klimaregulation des Erdsystems. Die sogenannte Alkalinität, als Maß für diese Aufnahmekapazität, spielt eine große Rolle in der „Klimaküche Ozean“. Sie hängt vor allem von Gehalt an Karbonaten im Meerwasser ab und ist Ergebnis der Wechselwirkungen verschiedener Komponenten des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts. Die Frage ist letztlich auch, wie stark der Klimawandel das natürliche Alkalinitäts-Gleichgewicht stören kann.

Keywords

Alkalinität, Kohlendioxid, CO₂, Ozean, Atmosphäre, Klima, Karbonat, Kohlenstoff, Klimawandel, Ozeanografie, pH-Wert, Nordsee

Klimaküche Ozean

Die Ozeane spielen eine große Rolle für die globale Klimaregulation auf der Erde, daher spricht man auch von der „Klimaküche Ozean“. Die Ozeane speichern und transportieren Stoffe und Energie und tauschen sie mit der Atmosphäre aus - und sie nehmen zurzeit etwa ein Viertel des durch die Menschen produzierten Kohlendioxids (CO₂) auf. Im Wasser der Ozeane ist etwa 50mal so viel Kohlenstoff gelöst wie in der Atmosphäre vorhanden ist und etwa 20mal so viel wie in den Landökosystemen gebunden ist (Denham et al. (IPCC), 2007). Mit absterbenden Algen und anderen organischen Partikeln sinkt ein großer Teil des Kohlenstoffs im Meer in die Tiefsee ab und wird teilweise sogar in den Sedimenten gespeichert - und damit dem kurzfristigen Kreislauf entzogen.

Allein aufgrund ihres großen Volumens puffern die Meere die menschengemachten Veränderungen in der Atmosphäre eine Zeitlang ab. Die Fähigkeit der Ozeane, Kohlendioxid aufzunehmen, ist aber nicht unbegrenzt. Stoffumsetzungen im Wasser und im Sediment, sogenannte biogeochemische Prozesse, spielen dabei eine ganz wesentliche Rolle. Diese Prozesse unterliegen ihrerseits wiederum natürlichen und menschengemachten Einflussfaktoren. Um Klimaänderungen besser verstehen und vorhersagen zu können, ist es daher essentiell, die physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge im Meer und besonders die Wechselwirkungen des Kohlenstoffhaushalts besser zu verstehen (Abb. 1).



Abb. 1: Wattenmeer an der Deutschen Nordseeküste (Foto: Christiane Eschenbach /HZG)

In den letzten Jahren ist man einer weiteren, bisher eher unterschätzten „Köchin“ in der „Klimaküche Ozean“ genauer auf die Spur gekommen: Die sogenannte Alkalinität kontrolliert das Kohlendioxid-Reservoir im Ozean und in der Atmosphäre. Die Frage ist, wie die Aufnahmekapazität der Ozeane durch die Alkalinität reguliert wird - und ob und inwiefern diese Fähigkeit durch den Klimawandel und gegebenenfalls sogar durch die menschlichen Anpassungsmaßnahmen daran gestört wird.

Zwischen Atmosphäre und Ozean besteht ein CO₂-Gleichgewicht

Zum Hintergrund: Der Kohlendioxid (CO₂)-Gehalt der Atmosphäre steht im Gleichgewicht mit dem CO₂-Gehalt des Wassers (Abb. 2). Nimmt der Kohlendioxidgehalt in der Luft zu, entsteht ein Konzentrationsgefälle zwischen Luft und Meer und das Ozeanwasser nimmt größere Mengen von CO₂ auf. Dadurch wird weiteres CO₂ aus der Luft im Wasser gelöst bis das Konzentrationsgefälle ausgeglichen und das Gleichgewicht wiederhergestellt ist. Das Kohlendioxid löst sich aber nicht nur im Wasser, sondern reagiert auch chemisch mit dem

Wasser. Durch diese Reaktion entsteht Kohlensäure und der pH-Wert des Meerwassers sinkt. Das Ozeanwasser wird durch die Aufnahme von CO_2 also etwas saurer. Und obwohl der pH-Wert generell im basischen Bereich bleibt (Abb. 2) ist diese sogenannte „Ozeanversauerung“ ein großes Problem, besonders für Meereslebewesen, die eine Kalkschale haben. Empfindliche Muscheln zum Beispiel müssen dann zusätzlich Energie aufwenden, um ihre Kalkschalen aufzubauen und die Schalenbildung ihrer Larven wird gestört. Das macht sie anfälliger für Fressfeinde (s. auch [Weltklimarat betont Bedeutung der Ozeane](#))

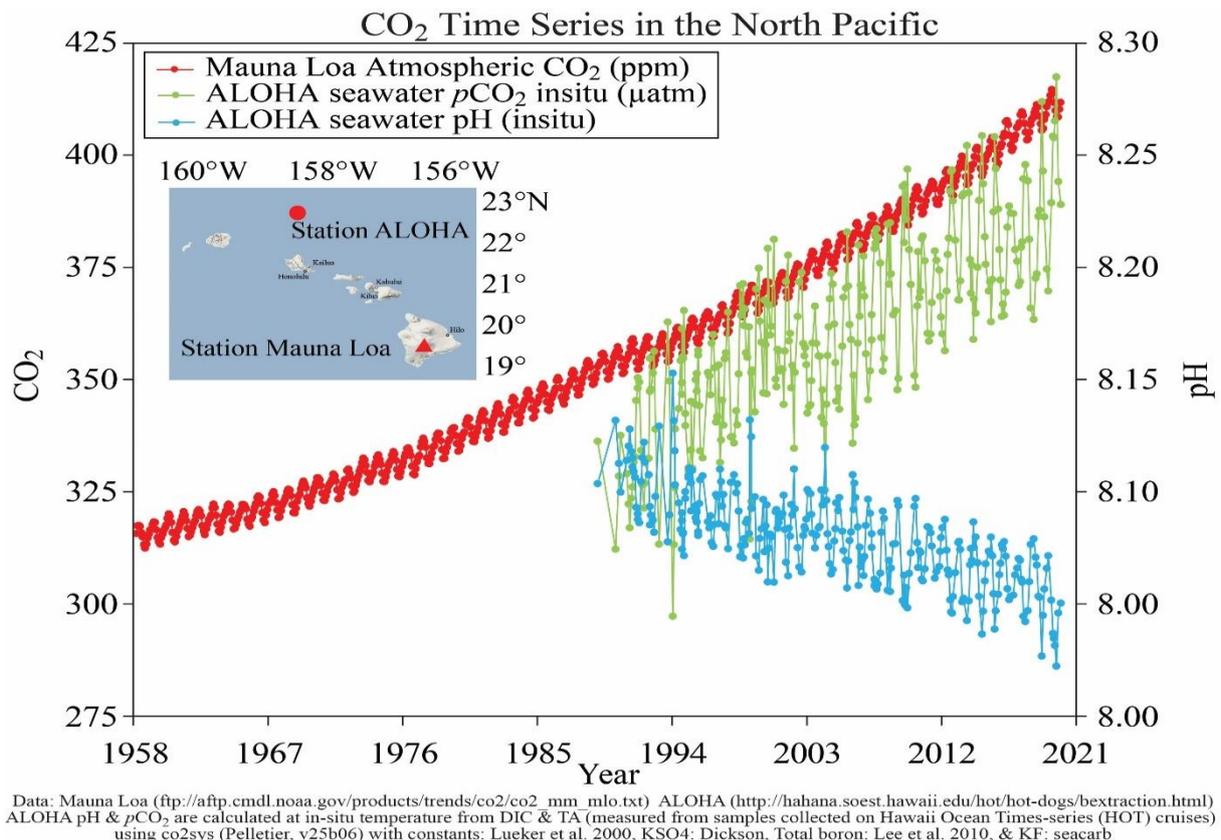


Abb. 2: In den letzten Jahrzehnten steigen die CO₂-Gehalte von Atmosphäre und Ozeanwasser an und der pH-Wert des Meerwassers sinkt. (Grafik: Mit freundlicher Genehmigung von pmel.noaa.gov/co2/; Aus: Feely, R. A., Wanninkhof, R., Carter, B. R., Landschützer, P., Sutton, A.J. & Triñanes, J. A. (2018). Global ocean carbon cycle. In J. Blunden, D. S. Arndt & G. Hartfield (Hrsg.), *State of the Climate in 2017* (S. S96-S100). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S96-S100. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1)

Welche Rolle spielt die Alkalinität in der „Klimaküche Ozean“?

Als weniger prominente, aber wichtige „Köchin“ spielt die Alkalinität eine große Rolle in der „Klimaküche Ozean“: Sie reguliert das CO₂-Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean. Welche Faktoren und Prozesse spielen dabei eine Rolle?

Der Begriff Alkalinität definiert allgemein das Säurebindungsvermögen von Böden, Gesteinen und Wasser. Das Säurebindungsvermögen beschreibt die Fähigkeit, Wasserstoff-Ionen zu binden. Damit ist es ein Maß dafür, wieviel Säure-Ionen aufgenommen werden können. Diese Pufferkapazität wird durch den Gehalt an basisch wirkenden Ionen

bestimmt, im Wasser vor allem durch die Konzentration von Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Karbonat (CO_3^{2-}). Vor allem das Karbonat-Ion bindet die Säure und entfernt damit das CO_2 aus dem Wasser.

Für die Fähigkeit der Ozeane, CO_2 aus der Luft aufzunehmen, spielt dieses sogenannte Karbonatgleichgewicht eine ganz wesentliche Rolle: In dem Maße, in dem Kohlendioxid aus dem Wasser entfernt wird, kann das Meer neue Kohlendioxid-Moleküle aus der Atmosphäre aufnehmen - und damit zur Klimaregulierung beitragen. Im Meerwasser tragen weitere Ionen, zum Beispiel Borate, zum Säurebindungsvermögen bei. Die biogeochemische Eigenschaft, die diese Regulierungsfunktion ausübt, ist die sogenannte Alkalinität. Sie beschreibt die Pufferkapazität der Ozeane für CO_2 - und pH-Veränderungen.

Berechnungen zeigen zum Beispiel für die Nordsee, dass die Alkalinität einen Anstieg des pH-Wertes bewirkt (Burt et al., 2016). Ohne die regulierende Funktion der Alkalinität läge dieser Wert um 0,01 bis 0,09 Einheiten niedriger und das Meerwasser wäre also saurer. Im offenen Ozean ist dieser Effekt der Alkalinität weit geringer als in der Nähe der Küste.

Dieser berechnete Anstieg des pH-Wertes durch die Wirkung der Alkalinität ist durchaus relevant, er liegt in der gleichen Größenordnung wie die in den letzten 20 Jahren beobachtete „Ozeanversauerung“, das heißt die Verringerung der pH-Werte des Meerwassers.

Aktuelle Untersuchungen zum Verständnis der Alkalinität

Am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) forschen verschiedene Arbeitsgruppen, wie die um Prof. Dr. Helmuth Thomas und die um Dr. Yoanna Voynova, zu diesem Thema. Sie beschäftigen sich mit der Kontrollfunktion der Ozeane für atmosphärische Kohlendioxid-Gehalte sowie mit den natürlichen und den durch den Menschen beeinflussten Schwankungen des Alkalinitätsgleichgewichts. Die verschiedenen angewandten Methoden ergänzen sich wechselseitig. Während Analysen von Isotopenzusammensetzungen große (Zeit-)Räume im Blick haben, gehen schiffsbasierte Studien wissenschaftlich sehr in die Tiefe, sind aber naturgemäß zeitlich (und auch räumlich) begrenzt. Durch die Kombination dieser komplementären Ansätze ist es möglich, das Thema intensiv und mit einer sehr großen räumlichen und zeitlichen Spannweite zu untersuchen.

Auf welchem Weg gelangt Alkalinität in das Meereswasser?

Verschiedene Meeresgebiete enthalten unterschiedliche Mengen an Karbonaten und es gibt verschiedene Wege, wie diese Hauptspieler der Alkalinität ins Wasser der Ozeane gelangen. Diese Unterschiede zu untersuchen, ist Voraussetzung, um die Regulierungsfunktion der Ozeane auch unter Bedingungen des Klimawandels zu verstehen und unter verschiedenen Szenarien vorhersagen zu können.

Alkalinität entsteht grundsätzlich auf zwei Wegen: Einerseits durch ganz langfristige Vorgänge bei der Verwitterung von Gesteinen und andererseits durch kurzfristige biologische Prozesse in den sauerstoffarmen (anaeroben) Sedimenten der Küstenmeere.

Bei der Verwitterung von Gesteinen an Land werden Stoffe freigesetzt, die über die Flüsse in die Küstengewässer und die Ozeane eingetragen werden. So gelangen z.B. Calcium, Karbonate (im Wasser als Hydrogenkarbonat- und Karbonationen) und andere Salze ins Meer. Die Konzentration hängt unter anderem von der Zusammensetzung der Gesteine in einer Region ab, und davon, wie viel Niederschlag dort fällt, mit dem die Karbonate vom Land ins Meer gespült werden.

Hydrogenkarbonat- und Karbonationen entstehen aber nicht nur durch die Verwitterung von Gesteinen, sondern auch im Wechselspiel der sogenannten biogeochemischen Prozesse direkt im Meer. Photosynthese und Atmung beeinflussen die Komponenten des Karbonatsystems, wie im Wasser gelöstes CO_2 , pH und anorganische Kohlenstoffverbindungen. Eine besonders interessante Rolle spielt hier die anaerobe Atmung, die durch bestimmte Bakterien in sauerstoffarmen Bereichen, zum Beispiel in den Sedimenten von flachen Küstengewässern und im Wattenmeer, stattfindet. Diese Bakterien nutzen für ihren Stoffwechsel nicht Sauerstoff, sondern Nitrat zur Energiegewinnung. Bei diesem Prozess, der als Denitrifikation bezeichnet wird, setzen die Mikroorganismen organische Stoffe um und als Stoffwechselprodukt werden schließlich gelöste Karbonationen frei. Für die tidebeeinflussten Wattenmeergebiete der Deutschen Bucht wurde dieser Zusammenhang von hohen Alkalinitätswerten und Denitrifikation gezeigt (Thomas et al., 2009). Das bedeutet: Je mehr Nitrat im Wasser oder im Sediment anaerob umgesetzt wird, desto mehr Karbonate geben die Mikroorganismen ab. Und damit steht letztlich auch mehr Karbonat zur Verfügung, die Alkalinität und damit die Aufnahmekapazität der Ozeane für CO_2 ist höher.

Um im Küstenmeer zu untersuchen, aus welcher Quelle ein gemessener zusätzlicher Eintrag von Karbonationen und damit von Alkalinität stammt, werden Radioisotope als „Tracer“ angewendet. So lässt sich zum Beispiel anhand bestimmter Isotope des natürlich vorkommenden Radiums im Wasser der Küstenmeere (^{224}Ra und ^{228}Ra) zeigen, dass sie entweder aus den Sedimenten am Meeresboden oder zum Beispiel aus den Watten direkt an der Küste stammen oder über die Flüsse eingetragen wurden. Abbildung 3 zeigt die Situation für die Nordsee: Im Mündungsgebiet der Elbe zeigen beide Radiumisotope maximale Konzentrationen, weiter draußen in der nördlichen Nordsee sind die

Konzentration dagegen nur gering. Entsprechend ist die Gesamtalkalinität im Wattenmeer besonders hoch.



Abb. 3: Das Vorkommen verschiedener Isotope mit verschiedenen Halbwertszeiten im Meereswasser der deutschen Nordsee gibt Hinweise auf die Herkunft der Alkalinität entweder vom Meeresboden oder von der Küste (224Ra: 1,7 - 47,4 dpm/(100 l), 228Ra: 0 - 14,4 dpm/(100 l), Alkalinität: 2153 bis 2354 $\mu\text{mol/kg}$; Daten aus Burt et al., 2015). (Grafik: Christiane Eschenbach / HZG)

Wie lässt sich Alkalinität messen - um Schwankungen festzustellen und zu verstehen?

In den letzten Jahren wurden Methoden entwickelt, um Alkalinität im Meerwasser automatisiert und damit kontinuierlich vor Ort zu bestimmen. Mit einem am HZG entwickelten Messinstrument („Hydro-FIA TA“) kann die Alkalinität im oberflächennahen Wasser direkt vor Ort von Schiffen aus im Durchflussverfahren gemessen werden. Für die Untersuchungen wird das neue Messinstrument mit einer sogenannten FerryBox (Petersen, 2014; ESKP-Artikel [„Meeresforschung mit dem Fährschiff“](#)) kombiniert. Die FerryBox misst gleichzeitig zahlreiche Zustandsgrößen wie Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Chlorophyll, pH, CO_2 -Partialdruck und gelöstes organisches Material.

Um Einsichten in den saisonalen Verlauf (Jahreszyklus) der Alkalinität zu gewinnen und ihre möglichen Quellen zu identifizieren, wurde die Gesamtalkalinität in einer Langzeitstudie über zehn Monate kontinuierlich alle zehn Minuten von bestimmten Schiffen aus gemessen, die in der Nordsee unterwegs waren (Abb. 4). Die Wissenschaftler fanden deutliche regionale und saisonale Schwankungen, die durch lokale Veränderungen in biologischen Prozessen und der Gezeitendynamik erklärt werden können. Während die Schwankungen weitgehend unabhängig von Einträgen durch die Flüsse Elbe und Rhein sind (sie erklären nur neun Prozent), spielt das Wattenmeer und die dortige Primärproduktion als Quelle von Alkalinität für die angrenzenden Küstengewässer eine große Rolle. Die Gezeiten sorgen für regelmäßigen Wasseraustausch zwischen Wattenmeer und angrenzender Nordsee.

Alkalinität und Klimawandel

Für den Zusammenhang von Alkalinität und Klimawandel spielen zwei Aspekte eine besonders wichtige Rolle: Zum einen geht es um die Frage, ob und inwieweit die Fähigkeit, im Meer Kohlendioxid binden zu können, direkt durch den Klimawandel beeinflusst und eventuell gestört wird. Ein anderer Aspekt sind die weitreichenden Maßnahmen, die diskutiert werden, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen. Die Frage ist hier letztlich, ob dieses „Climate Engineering“ an anderer Stelle indirekte, unerwünschte Folgen nach sich zieht. Da Küstensysteme wichtige regulatorische Player sind, ist es besonders wichtig, diese Zusammenhänge und die verschiedenen Einflüsse auf die Alkalinität gut zu verstehen.

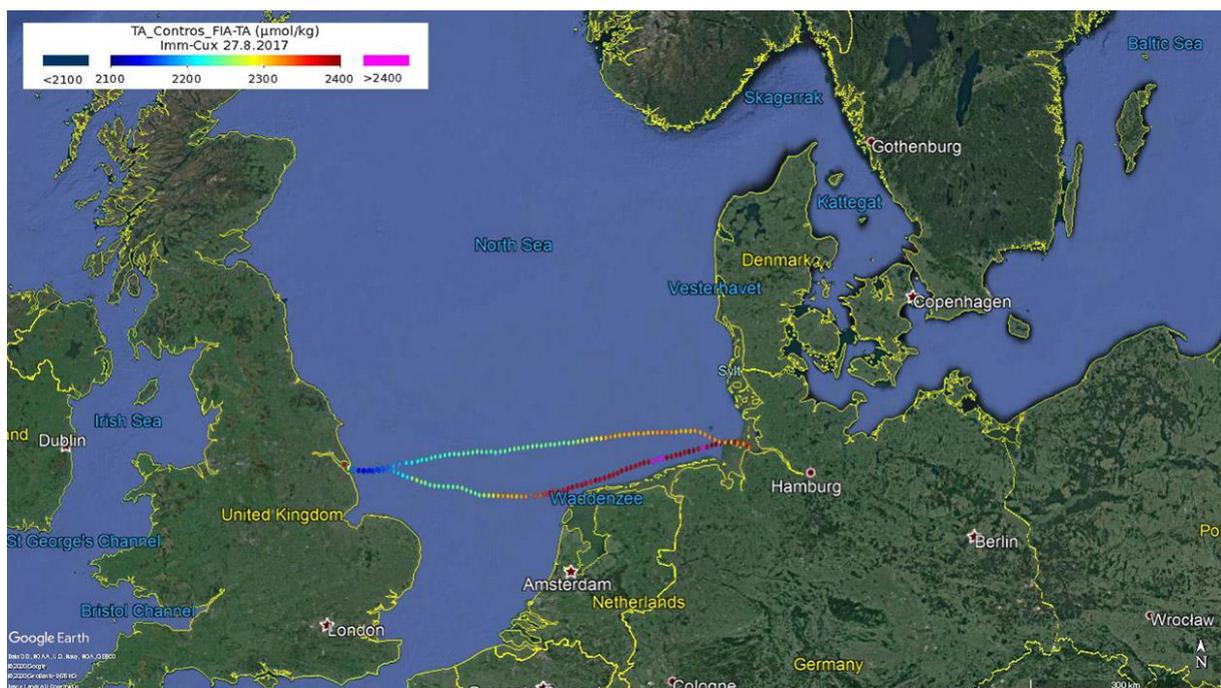


Abb. 4: Die Alkalinität variiert räumlich; Zum Beispiel lagen die von Bord eines Schiffes aus gemessenen Werte in der Nordsee am 27. August 2017 zwischen 2100-2400 $\mu\text{mol/kg}$. (Karte: Datenportal HZG)

Die Stoffflüsse, welche die Alkalinität bestimmen, werden daher untersucht und die Auswirkung auf die CO₂- und pH-Pufferkapazität abgeschätzt. Wichtig ist, zu wissen, wie empfindlich die beteiligten Prozesse auf Klima- und andere menschengemachte Veränderungen reagieren.

Doch wie wirkt der Klimawandel auf die Entstehung von Alkalinität ein?

Der Klimawandel greift in den Entstehungsweg „Verwitterung“ ein, indem er die Verwitterungsraten von Gesteinen an Land erhöht. Einerseits beschleunigt die Temperaturerhöhung die Verwitterungsrate direkt, andererseits werden durch den Rückzug der Gletscher weitere Flächen freigelegt und der Erosion und Verwitterung ausgesetzt. Dadurch ist möglicherweise mit einem Anstieg des Transports von Erosions- und Verwitterungsprodukten, und damit von Karbonaten, vom Land in die Ozeane zu rechnen.

Komplizierter ist die Wirkung auf den sogenannten „metabolischen Entstehungsweg“ der Alkalinität. Damit ist der derjenige Anteil gemeint, der durch den Stoffwechsel von Lebewesen bedingt ist (Abb. 5). Eine Temperaturerhöhung wirkt in vielfältiger Weise auf den Stoffwechsel der Lebewesen ein. Photosynthese und Atmung wiederum beeinflussen die Komponenten des Karbonatsystems, wie das im Wasser gelöste CO_2 , den pH-Wert und anorganische Kohlenstoffverbindungen, und die daraus resultierende Alkalinität. Diese Wechselwirkungen stehen wiederum in Verbindung zur verfügbaren Menge an Nährstoffen und organischen Kohlenstoffverbindungen, die quasi die Nahrungsgrundlage bilden. Es wird daher zurzeit untersucht, wie die anaeroben Prozesse auf einen verstärkten Eintrag dieser Stoffe in die Ökosysteme reagieren. Festzuhalten ist also: Die die Alkalinität bestimmenden Prozesse sind also empfindlich gegenüber klimatischen und menschengemachten Veränderungen.



Abb. 5: Eine Temperaturerhöhung verändert den Stoffwechsel, zum Beispiel von Algen. (Foto: Torsten Fischer / HZG)

Maßnahmen zur CO_2 -Senkung beeinflussen die Alkalinität

Um die Konzentration des atmosphärischen Kohlendioxids drastisch zu verringern, wie im Klimaschutz-Übereinkommen von Paris vereinbart, werden verschiedene Maßnahmen diskutiert. Eine wichtige Rolle spielt in allen Szenarien die Nutzung von Bioenergie, das heißt der Anbau von Energiepflanzen in großem Maßstab (Climate Engineering). Dieser Energiepflanzenanbau wird große Mengen an Dünger benötigen. Dies wiederum würde zu einem verstärkten Nitrateintrag in die Küstenmeere führen und entsprechende Konsequenzen für die Umwelt nach sich ziehen. Denn durch den aufgezeigten Zusammenhang mit der Alkalinität wird die Fähigkeit zur Aufnahme von Kohlendioxid gesteigert.

Nitrateinträge überdüngen - mit den bekannten Folgen der Eutrophierung: Massenwachstum von Algen, starke Sauerstoffzehrung beim Abbau der entstehenden organischen Substanz, sauerstoffarme Zonen, Verstärkung von anaeroben Stoffwechselvorgängen und schließlich Absterben von Tieren, die auf Sauerstoff angewiesen sind, wie zum Beispiel Fischen und Muscheln. In manchen überdüngten Meeresgebieten gibt es am Meeresgrund schon heute solche sauerstofffreien, für viele Lebewesen lebensfeindlichen Zonen. Der intensive Anbau von Energiepflanzen an Land kann diesen Effekt verstärken (vgl. Wahl, 2020)

Zusätzliches Nitrat kann also keine Lösungsstrategie für den Klimawandel sein. Es gilt immer, Vor- und Nachteile verschiedener Maßnahmen zu diskutieren und abzuwägen. Überdüngung und Klimawandel sind an vielen Küsten weltweit ernste Problem. Die Folgen müssen weiter genau beobachtet und untersucht werden, auch im Zusammenhang miteinander und mit anderen Faktoren menschlichen Wirkens.

Zusammenfassung und Ausblick:

Die Zusammenhänge noch besser verstehen

Die Fähigkeit der Ozeane, das atmosphärische CO₂ auf verschiedenen Zeitskalen zu regulieren, ist ein wesentlicher Player für die Klimaregulation des Erdsystems. Ohne die puffernde Wirkung der Ozeane würden die vom Menschen in die Atmosphäre ausgestoßenen Treibhausgase eine noch deutlichere Temperaturerhöhung zur Folge haben. Als regulierende Eigenschaft spielt das Säurebindungsvermögen der Meere, genauer die sogenannte Alkalinität, eine große Rolle in der „Klimaküche Ozean“. Die Alkalinität ist ein Maß für die Aufnahmekapazität der Ozeane für CO₂ und hängt vor allem von Gehalt an Karbonaten im Meerwasser ab und ist Ergebnis der Wechselwirkungen verschiedener Komponenten des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts. Dieses komplizierte Wechselspiel zu untersuchen und zu verstehen, ist eine wichtige Frage aktueller Untersuchungen. Die Frage ist letztlich, wie stark die gelösten Karbonate im Meer Kohlendioxid binden können, und ob diese Fähigkeit durch den Klimawandel verändert wird.

Die Alkalinität schwankt in den flachen Küstengewässern stark, da zum Beispiel vom Land Süßwasser, Alkalinität und Nährstoffe eingetragen werden. Auf längeren Zeitskalen sorgen Erosion und Verwitterung über die Flüsse für Alkalinität in den Küstengewässern und schließlich im offenen Ozean. Andererseits bauen zum Beispiel manche Lebewesen im Ozean (wie Korallen) Kalkgehäuse und entnehmen dafür Karbonate aus dem Wasser, ein Vorgang, der aber wiederum selbst durch die Ozeanversauerung beeinflusst wird.

Der menschliche Einfluss auf die Alkalinität zeigt sich in verschiedenen Aspekten: Es bestehen möglicherweise Zusammenhänge mit den beschleunigten Verwitterungsraten und mit dem (übermäßigen) Nährstoffeintrag in die Flüsse und durch diese in die Ozeane. Aber

auch die Bemühungen, den Klimawandel einzudämmen, können das natürliche Alkalinitäts-Gleichgewicht stören. Da Küstensysteme wichtige regulatorische Funktionen haben, ist es besonders wichtig, die verschiedenen Einflüsse auf die Alkalinität und diese Wechselwirkungen und Zusammenhänge gut zu verstehen.

Referenzen

- Burt, W. J., Thomas, H., Hagens, M., Pätsch, J., Clargo, N. M., Salt, L. A., Winde, V. & Böttcher, M. E. (2016). Carbon sources in the North Sea evaluated by means of radium and stable carbon isotope tracers. *Limnology and Oceanography*, 61(2), 666-683. doi:10.1002/lno.10243
- Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., ... Zhang, X. (2007). Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller (Hrsg.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 499-587). Cambridge: Cambridge University Press.
- Feely, R. A., Wanninkhof, R., Carter, B. R., Landschützer, P., Sutton, A.J. & Triñanes, J. A. (2018). Global ocean carbon cycle. In J. Blunden, D. S. Arndt & G. Hartfield (Hrsg.), *State of the Climate in 2017* (S. S96-S100). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S96-S100. doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1
- Petersen, W. (2014). FerryBox systems: State-of-the-art in Europe and future development. *Journal of Marine Systems*, 140(Part A), 4-12. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.07.003
- Thomas, H., Schiettecatte, L.-S., Suykens, K., Koné, Y. J. M., Shadwick, E. H., Prowe, A. E. F., Bozec, Y., de Baar, H. J. W. & Borges, A. V. (2009). Enhanced ocean carbon storage from anaerobic alkalinity generation in coastal sediments, *Biogeosciences*, 6, 267-274, doi:10.5194/bg-6-267-2009
- Voynova, Y. G., Petersen, W., Gehrung, M., Aßmann, S. & King, A L. (2019). Intertidal regions changing coastal alkalinity: The Wadden Sea-North Sea tidally coupled bioreactor. *Limnology and Oceanography*, 64(3), 1135-1149. doi:0.1002/lno.11103
- Wahl, M. (2020). Ein Zuviel an Nährstoffen in der Ostsee [Interview]. In J. Kandarr, O. Jorzik, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Biodiversität im Meer und an Land: vom Wert biologischer Vielfalt* (S. 89-91). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.1.4.2

Zitiervorschlag

Eschenbach, C. (2020, 10. Dezember). Alkalinität - die unterschätzte Köchin in der „Klimaküche Ozean“. *Earth System Knowledge Platform [eskp.de]*, 7. doi:10.2312/eskp.053



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen: eskp.de | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

eskp.de | Earth System Knowledge Platform - die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft