

Wirkung des Klimawandels im Zusammenspiel mit höheren atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf die Kohlenstoffspeicherung und Biosphäre im Ozean

Johanna Wittholm, Marin Dora, Stella Paukku, Queenie Lu, Emma Heinzer, Jessica Carilli, Jannis Portmann

Zusammenfassung

Bei einer Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf 650 ppm wird ein Anstieg der Meeresoberflächentemperatur um 1.35°C bis 2100 erwartet, bei 1370 ppm sind es 2.46°C.¹ Ein grosser Anteil des CO₂ in der Luft wird vom Ozean aufgenommen², die Gasaustauschgeschwindigkeit ist dabei proportional zu der Differenz der Konzentrationen in der Luft und im Wasser³ sowie zur Windgeschwindigkeit.⁴ Die CO₂-Senke ist schon jetzt schwächer, als man beim Trend des atmosphärischen Kohlenstoffs erwarten würde, was an den Winden im südlichen Ozean⁵ und den erhöhten Ozeantemperaturen⁶ liegen könnte. In Zukunft soll noch weniger aufgenommen werden⁷, die quantitative Vorhersage mit Globalmodellen ist allerdings schwierig^{8 9}.

Im Ozean kann das CO₂ mit Karbonaten zu Bikarbonaten reagieren. Diese sowie gelöstes CO₂ können dann durch die Ozeanströmung in die Tiefe transportiert werden¹⁰. Das führt zu einer Verminderung des CO₂-Partialdrucks im Oberflächengewässer, wodurch mehr CO₂ aufgenommen werden kann³. Weiter kann das CO₂ durch Photosynthese fixiert werden und treibt so die biologische Pumpe an¹⁰. Der Kohlenstoff der ozeanischen Biosphäre wird nach dem Absterben in Form von partikulärem oder gelöstem organischem Material in tiefere Ozeanschichten sinken, wo es zum Teil durch mikrobielle Prozesse zurück in CO₂ umgewandelt wird¹¹. Zum Teil wird der Kohlenstoff in langlebiges organisches Material umgewandelt, welches Jahrtausende in der Tiefsee gelagert werden kann.¹²

Das zusätzliche CO₂ im Wasser führt allerdings auch zu einer Ozeanversauerung.¹³ Der pH-Wert ist bereits um 0.1 gesunken und es wird erwartet, dass er bis 2100 noch weiter sinkt.¹⁴ Dies führt zur Kalklösung, was Arten, die Kalziumkarbonat zum Überleben brauchen, beeinträchtigt.^{15 16} Bei Algen verursachen die sauren Bedingungen eine veränderte Artenzusammensetzung¹⁷ und es konnten Verhaltensänderungen bei Haien beobachtet werden¹⁸. Wegen der Versauerung und den höheren Wassertemperaturen kommt es ausserdem zur Korallenbleiche¹⁹, was negative Einflüsse auf die Fischerei, den Küstenschutz²⁰, sowie den Tourismus²¹ haben kann.

Teilrecherche 1: Klimamodellvorhersagen für Wassertemperatur und CO₂ Konzentrationen

Johanna Wittholm

Kurzzusammenfassung

Trends aus den Jahren zwischen 1969 und 1990 deuten darauf hin, dass die Meeresoberflächentemperatur (SST) im Schnitt mit einer Rate von ungefähr 0.1°C pro Jahrzehnt zunimmt²². Für das Jahr 2100 wird ein mittlerer Anstieg der Meeresoberflächentemperatur von 1.35°C resp. 2.46°C (rcp4.5(650 ppm)/rcp8.5(1370ppm)) vorhergesagt¹. Es wird erwartet, dass 2072(+17 Jahre) resp. 2051(+16 Jahre) (rcp4.5/rcp8.5) eine Meeresoberflächentemperatur erreicht wird, die ausserhalb der historischen Grenzen liegt. Beim pH-Wert war das bereits 2008 der Fall²³. Dass die Senke von CO₂ schwächer relativ zum Trend ist, der wegen des grossen Anstiegs des atmosphärischen CO₂ erwartet wird, könnte an den Winden im südlichen Ozean liegen⁵. Prinzipiell ist der südliche Ozean stärker von den Veränderungen im Kohlenstoffzyklus betroffen, was daran liegen könnte, dass es mit dem Klimawandel zu mehr Niederschlag und einem höheren Wärmefluss kommt, was zu einer verstärkten Schichtung des Ozeans führt, wodurch ein geringerer Fluss des Kohlenstoffs nach unten stattfindet⁶.

Global and Regional Sea Surface Temperature Trends²²

Trends in SST zwischen 1969 und 1990, Anomalien berechnet mit satellite-based climatology und Beobachtungen von WOA94, ungefähr 0.1°Cdec⁻¹, teilweise kühler, Unsicherheiten u.a. durch zu wenig in situ Daten, vor allem auf Südhemisphäre

Global and regional evolution of sea surface temperature under climate change¹

Änderung SST, regional, Unterschiede rcp4.5, rcp8.5 und historical run, K-menas cluster procedure-> 8 cluster, GCMs CMIP3 und CMIP5, rcp4.5: 0.075-0.21°Cdec⁻¹, rcp8.5: 0.13-0.36°Cdec⁻¹, bis 2100: Anstieg 2.46°C (rcp8.5) und 1.35°C(rcp4.5)

The projected timing of climate departure from recent variability²³

Untersucht Zeitraum, in dem Klima Grenzen der historischen Variabilität durchbricht, CMIP5 Modelle, Meeresoberflächentemperatur: rcp4.5: im Mittel um 2072(+17 Jahre), rcp8.5: im Mittel 2051(+16 Jahre); pH: 2008 (wenig historische Variabilität)

Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change⁵

Senke von CO₂ schwächer relativ zum Trend erwartet wegen grossem Anstieg von atm. CO₂, liegt vermutlich an Winden im südlichen Ozean, führt wahrscheinlich zu höherem Level der Stabilisation der atm. CO₂ Konzentration, inverse Methode

Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming⁶

Veränderung Kohlenstoffzyklus im Meer durch Klimawandel, gekoppeltes Ozean-Kohlenstoff Modell, Stabilisation CO₂ in Luft bei 350-1000ppm, Southern Ocean stärker betroffen, wegen mehr Regen/Wärmefluss->Schichtung->weniger Fluss nach unten

Teilrecherche 2: Mechanismen der CO₂-Aufnahme durch den Ozean

Queenie Lu

Kurzzusammenfassung

30% des gesamten anthropogenen CO₂ wurden in den letzten Jahrzehnten vom Ozean aufgenommen². Die Aufnahme hängt von der Differenz der CO₂-Konzentration in der Luft und im Ozean ab. Der CO₂-Fluss von Luft in den Ozean wird wie folgt beschrieben:

$$F = k_g(pCO_{2,a} - pCO_{2,s}) = k_g \Delta pCO_2$$

wobei $pCO_{2,a}$ den Partialdruck in der Luft, $pCO_{2,s}$ den Partialdruck im Ozeanwasser und k_g der Gasaustauschkoeffizient darstellt³. Weiter hängt die Gasaustauschgeschwindigkeit mit der Windgeschwindigkeit zusammen, was vor allem für Gebiete mit niedrigem CO₂-Partialdruck von Bedeutung ist⁴. So können höhere Windgeschwindigkeiten für erhöhte CO₂-Aufnahme sorgen. Das gelöste CO₂ kann dann durch die Verwitterung von Karbonaten weiter zu Bikarbonaten reagieren¹⁰. Beide Formen werden durch die Ozeanströmungen transportiert²⁴. Weiterhin kann das gelöste CO₂ durch Photosynthese fixiert werden oder ausgasen¹⁰.

Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans²

Schätzung der Auflösungsrate von CaCO₃ in den globalen Ozeanen durch die Totalalkalinität und Chlorfluorkohlenwasserstoffe und C¹⁴; Untersucht Aragonit- und Calcitsättigung; Diskutiert die möglichen Auswirkungen in der Zukunft von anthropogenem CO₂ auf Tierarten, die Kalziumkarbonatschalen besitzen.

Atmospheric carbon dioxide and the ocean³

Untersucht die Menge an anthropogenem CO₂, die durch den Ozean in den letzten Jahren aufgenommen wurde; Berechnung von CO₂-Fluss von der Luft in den Ozean durch Messungen der Partialdrücke; Stellungnahme und Verbesserungsvorschläge für das Paper von Tans, Fung & Takahashi (1990); Isotopenmarkierung als weitere Methode; Diskutiert die Rolle der Meeresbiologie und die Faktoren, die die CO₂-levels in der Zukunft beeinflussen.

Global sea-air CO₂ flux based on the climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects⁴

Schätzung des globalen CO₂-Flusses aus der Luft in den Ozean anhand der klimatologischen Verteilung des CO₂-Partialdrucks im Oberflächenwasser; Untersucht den Effekt von Wind, saisonale Variation des CO₂-Partialdrucks

The role of the ocean carbon cycle in climate change¹⁰

Diskutiert die Wichtigkeit des Ozeans als Kohlenstoffspeicher, anorganischer und organischer Kohlenstoffkreislauf; Änderung des Kohlenstoffkreislaufs durch die natürlichen Klimaänderungen im Verlaufe der Zeit; Diskutiert die ozeanische Aufnahme von anthropogenem CO₂; zukünftige Herausforderungen in der Forschung

Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO₂²⁴

Neue Schätzung des CO₂-Flusses aus der Atmosphäre in den Ozean durch die Ozeaninversionsmethode; Fehlerbewertung der Methode; diskutiert die Bedeutung des Kohlenstoffeintrags aus Flüssen für den CO₂-Flusses zwischen der Atmosphäre und Ozean; Vergleich der Werte mit Daten aus anderen Papers, bei denen eine andere Methode angewendet wurde; ozeanischer Transport des Kohlenstoffs

Teilrecherche 3: Direkte Auswirkungen der Ozeanversauerung auf die Biosphäre

Emma Heinzer

Kurzzusammenfassung

Die erhöhte Auflösung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids durch menschliche Aktivitäten führt zu einer Abnahme des pH-Wertes, was weitere Auswirkungen auf die Wasserchemie und die Biosphäre hat. Die Nährstoffverfügbarkeit, die Primärproduktion, die Kalzifizierung oder Änderungen in den zellulären Mechanismen sind nur Beispiele von gestörten Prozessen, welche sich dann auf höheren Stufen niederschlagen¹⁵. Arten, welche Kalziumkarbonat zum Überleben brauchen, sind wegen der Kalklösung durch die Senkung des pHs stark beeinträchtigt, als Individuum und als Population^{15 16}. Änderungen in der Populationszusammensetzung findet nicht nur bei Kalk bildenden Organismen statt, sondern auch bei Algen, wo eine höhere Konzentration an CO₂ im Wasser zu einem stärkeren Wettbewerb führt¹⁷, oder bei Korallen¹⁹. Letztere sind ausserdem wegen der Kombination von CO₂- und Temperaturanstieg der 'Korallenbleichung' ausgesetzt¹⁹. Viele Studien fokussieren auf Plankton und eine kalzifizierende Fauna, viele andere Organismen, wie grössere Tiere, sind aber auch benachteiligt. Haifische weisen zB. klare Verhaltensstörungen wegen unnatürlichen neurologischen Aktivitäten auf¹⁸.

Auswirkung der Ozeanversauerung auf marine Lebensprozesse¹⁵

Zusammenfassung vieler wichtigen Auswirkungen der Ozeanversauerung. Die Kalzifizierung, die Photosynthese, die Kohlenstoff- und Stickstoff-Fixierung, die Nährstoffverfügbarkeit, die interne pH-Kontrolle und die Anpassung sind die Hauptthemen. Wichtige Informationslücken werden auch gelistet.

Effects of CO₂-driven ocean acidification on the early development stages of invertebrates¹⁶

Fokus auf Effekte von erhöhtem pCO₂ auf Kalzifizierer. Gestörte Entwicklungs- und Reproduktionsphasen beeinflussen sowohl die Populationsgrösse und –Zusammensetzung als auch die Fitness und die Mortalität einzelner Individuen. Wichtige Toleranzunterschiede zwischen den unterschiedlichen Lebensstadien und Arten.

Impact of ocean acidification on the structure of future phytoplankton communities¹⁷

Modell um die Entwicklung der Artenzusammensetzung des Phytoplanktons im Laufe eines hypothetischen 21. Jahrhunderts. Erhöhter pCO₂ kann zu Wettbewerb innerhalb und zwischen unterschiedlichen Gruppen führen und somit auch in einer veränderten Artenzusammensetzung. Ozeanische Versauerung ist der grösste Driver von Biomass- und Funktionsvielfaltänderung.

Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders¹⁹

Untersuchung von dem 'bleaching', der organischen Produktivität und dem Zusammenhang mit den Verkalkungsraten an 3 unterschiedlichen CO₂-Konzentration Szenarios. Bleaching wegen CO₂ wurde bestätigt. 1/3 Korallenarten ist bei höheren CO₂-Konzentrationen produktiver. Temperatur auch ein wichtiges Element für die Bestimmung der Überlebensrate.

Biological responses of sharks to ocean acidification¹⁸

Haifische erleiden unter der Ozeanversauerung. Sie sind sehr wichtig für die Nahrungskette. Physiologische Probleme wegen erhöhten CO₂-Konzentrationen waren weniger deutlich als Verhaltensänderungen. Die Fitness, Mobilität und Wachstum waren auch geprägt als das Embryoüberleben und frühe Entwicklungsdauer.

Teilrecherche 4: Indirekte Auswirkungen der Ozeanversauerung

Marin Dora

Kurzzusammenfassung

Im Great Barrier Reef (GBR) wurden negative Auswirkungen auf den Falterfischbestand durch Korallenbleiche nachgewiesen²⁵. Das Korallensterben hat einen negativen Einfluss auf die lokale Fischerei, den Küstenschutz²⁰ und den Tourismus²¹. Diese Veränderungen zu monetarisieren ist jedoch sehr schwierig²⁰. Um dem entgegenzuwirken sind kurzfristig lokale Strategien notwendig. Die lokale Wirtschaft muss flexibel reagieren, Traditionsbetriebe haben es dabei schwieriger²⁶. Auf der thailändischen Insel Koh Tao wird von der Regierung dafür aber keine Strategie wahrgenommen²⁷.

Sublethal effects of coral bleaching on an obligate coral feeding butterflyfish²⁵

Untersucht Auswirkungen durch Korallenbleiche auf den Butterflyfish im GBR, Untersuchung von 3 zufällig ausgewählten Orten, keine direkten Auswirkungen auf Fischvorkommen, langfristige Auswirkungen werden vermutet, wurde in anschließendem Paper bestätigt

People and the changing nature of coral reefs²⁰

Veränderungen der Korallenriffe und deren Einfluss auf die Menschen darstellen, Zusammenführung von Papern und Studien, negativer Einfluss für Fischfang und Küstenschutz, schwierige Abschätzung für sozioökonomischen Wert, Gedankenexperiment wie Menschen reagieren könnten

The Great Barrier Reef: Vulnerabilities and solutions in the face of ocean acidification²¹

Zeigt Verwundbarkeit des GBR durch OA auf und diskutiert Lösungen, Ökonomische Verluste für Fischerei, Küstenschutz und Tourismus schwierig zu berechnen, bereits Massnahmen für Küstenschutz umgesetzt, Nutzungswandel möglich, abdämpfende Massnahmen wichtig

Social and cultural issues raised by climate change in Pacific Island countries: an overview²⁶

Einblick in die Veränderungen durch den Klimawandel auf den Pazifischen Inseln, Zusammenfassung über Auswirkungen und Adaption, Ozeanversauerung ein Faktor von vielen, kurzfristig lokale Strategien, Tradition vs. Adaption, wer bezahlt?

Climate change perception of the dive tourism industry in Koh Tao island, Thailand²⁷

Wie reagieren lokale Stakeholder auf die Veränderungen des Ozeans und wie stehen sie dazu, *Case study* in Koh Tao island mit Interviews, niemand ist sich der Ozeanversauerung bewusst, Korallenbleiche wird aber registriert, es wird keine Strategie durch die Regierung wahrgenommen

Teilrecherche 5: Modellvorhersagen der C-Speicherung

Jannis Portmann

Kurzzusammenfassung

Ein grosser Teil des atmosphärischen CO₂ wird von Senken aufgenommen (teilweise >50% der Emissionen)^{28 29}. Es wird jedoch erwartet, dass die Ozeane in Zukunft weniger des CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen werden⁷. Daher ist es von Interesse, diese Veränderung abzuschätzen. Eine der grössten Herausforderungen bei der Vorhersage der Änderung der C-Flüsse (und dadurch der Aktivität der Senken) aus der Luft in den Ozean, ist die Unterteilung in Klima-interne Variabilität und anthropogene Klimaänderung^{8 9}. Eine Vorhersage mit Variabilität kann zurzeit für 3-5 Jahre gemacht werden⁹.

Trends in the sources and sinks of carbon dioxide²⁸

Es bestehen Verzögerungen zwischen den Messungen in der Atmosphäre und dem Uptake der Ozeane. Dies führt zu grossen Vorhersage-Unsicherheiten. Weiter ist es wahrscheinlich, dass die Aufnahme Flüsse nicht im Gleichgewicht mit den Luftkonzentrationen sind.

Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years²⁹

Die Ozeane haben in dieser Zeitspanne eine kaum veränderte Aufnahmerate, jedoch gibt es starke Veränderungen in der Regionalität. Es gibt noch keine Anzeichen einer Verringerung der Aufnahme aus der Atmosphäre.

Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean⁷

Chemische Betrachtung des Ozeans in allen Schichten und die Veränderung dessen durch atmosphärische CO₂. Es werden Simulationen von verschiedenen Pathways gemacht.

Timescales for detection of trends in the ocean carbon sink⁸

Forced trends vs. interne Variabilität: Forced trends etablieren sich erst jetzt und können nur in isolierten Regionen nachgewiesen werden. In den kommenden Jahrzehnten (bis 2100) sollen jedoch immer grössere Regionen folgen.

Predicting the variable ocean carbon sink⁹

Globale Modellierung der CO₂-Aufnahmevariabilität. Eine zeitliche und örtliche Vorhersage soll bis zu 5 Jahren möglich sein. Dies basiert auf dekadischer Analyse der Vergangenheit.

Teilrecherche 6: Weitere Kohlenstoffflüsse

Stella Pauku

Kurzzusammenfassung

Die biologische Pumpe in Ozeanen wird durch die CO₂-Fixierung von Primärproduzenten angetrieben³⁰. Ein Grossteil des Kohlenstoffs landet wieder durch Remineralisierung als CO₂ in die Atmosphäre, wobei die Tiefe, in der die Remineralisierung stattfindet, einen starken Einfluss auf den Gleichgewichtszustand hat¹¹. Ein Teil des Kohlenstoffs landet durch mikrobielle Prozesse in langlebiges RDOM, welches tief im Ozean für tausende Jahre gespeichert sein kann¹².

Die relevantesten Methanflüsse in Ozeanen sind die Destabilisierung von Methanhydraten was hingegen zur Versauerung führt³¹, und die mikrobielle Produktion von Methan, welches z.T. wegen Meereis im Wasser akkumulieren kann³².

Climate-driven trends in contemporary ocean productivity²⁸

Untersucht die Effekte von klimatischer Variabilität auf Netto-Primärproduktion. In den letzten 10a ist die NPP wegen einem El Nino Ereignis anfangs gewachsen, ist danach aber geringer geworden. Das Paper sagt eine Verringerung der C-Fixierung der Ozeane in den nächsten Jahren wegen Erwärmung voraus.

The impact of remineralization depth on the air-sea carbon balance¹¹

Der Einfluss von der Tiefe, bei der Remineralisierung von organischem C zu CO₂ stattfindet, auf die CO₂-Speicherfähigkeit vom Ozean und auf die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen wird untersucht. Ozeane können mehr CO₂ speichern, wenn die Tiefe der Remineralisierung grösser ist. Erwärmung --> erhöhte mikrobielle Aktivität --> kleinere Remineralisierungstiefe --> kleinere CO₂-Speicherfähigkeit

Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean¹²

Untersucht Rolle von Mikroben bei der langfristigen Speicherung von organischem Kohlenstoff als recalcitrant dissolved organic matter (RDOM), welches nicht bioverfügbar ist und daher bis zu 6000 Jahre alt sein kann. Momentan ist die Menge an C im RDOM vergleichbar mit der Menge an C in der Atmosphäre.

Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification³¹

Methanhydrate werden unter hohem Druck und tiefen Temperaturen geformt, und können potentiell durch die Klimaerwärmung instabil werden. Durch aerobische Oxidation kann das Methan zu CO₂ umgewandelt werden, was zur Ozeanversauerung beiträgt, welches im Arktischen Ozean fast 2x so gross wie der Effekt von CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre sein kann.

Sea ice in the Arctic Ocean: Role of shielding and consumption of methane³²

Meereis blockiert die Ausgasung von Methan aus dem Wasser in die Atmosphäre und produziert OH-Radikale, welche zur Zerstörung von Methan beitragen. Der Verlust von Meereis könnte zu 1.5 Tg Methanemissionen führen.

Teilrecherche 7: Änderung der Ozeanversauerung aufgrund des Klimawandels

Jessica Carilli

Kurzzusammenfassung

Die zunehmende CO₂-Aufnahme des Ozeans wegen zunehmender CO₂-Emissionen in der Atmosphäre führt zur pH-Senkung des Ozeans und verringert somit auch die CO₃²⁻-Konzentration¹³. Seit der vorindustriellen Zeit ist der pH-Wert des Ozeans global um 0,1 gesunken und es wurde geschätzt, dass ungebremste CO₂-Emissionen den pH-Wert des Ozeans bis zum Jahr 2100 um bis zu 0,4 und bis 2300 um 0,77 senken werden¹⁴.

Vom Menschen verursachte Änderungen des pH-Werts im Ozean können durch natürliche Prozesse verstärkt werden, wenn einige Einflüsse aus anderen Prozessen (Remineralisierung usw.) übersehen werden, die zur weiteren Versauerung führen³³. Schliesslich werden die zukünftigen Projektionen der Ozeanversauerung nicht wesentlich von den Rückkopplungen des Klimawandels abhängen, sondern sie werden den steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen folgen³⁴, aber der im Ozean gespeicherten Kohlenstoff wird von der Versauerung der Ozeane nicht wesentlich verändert³⁵.

Ocean acidification¹³

Fasst die Karbonatsgleichgewichte sowie die aktuelle CO₂-Situation zusammen. Daten der verschiedenen Ozeane wie pH und Aragonit über die letzten Jahre und in die nahe Zukunft, mit Fokus auf die Unterschiede zwischen neuen und alten Daten, die modelliert wurden.

Ocean acidification and climate change¹⁴

Vergleicht vergangene und aktuelle Beobachtungen der Ozeanversauerung; zeigt mögliche Vorhersage laut der RCP 8.5 Szenario; berücksichtigt Auswirkungen auf biochemische Prozesse; mögliche Wirkung der Kombination von Ozeanversauerung-Klimawandeln; Zukünftige Milderung.

Processes Driving Global Interior Ocean pH Distribution³³

Wirkung der anthropogenen Veränderungen und natürliche Prozesse gemeinsam auf den pH-Wert des Ozeans und Veränderungen der Ozeanversauerung; → Verstärkung der anthropogenen pH-Änderungen durch natürliche Prozesse, Fortsetzung und Verstärkung mit fortschreitender Versauerung des Ozeans.

Projected climate change impact on oceanic acidification³⁴

Untersuchung der Sensitivität der zukünftigen Ozeanversauerung auf die Rückkopplungen des Klimawandels in einem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell; die künftige Versauerung der Ozeane wird den künftigen atmosphärischen CO₂-Konzentrationen eng folgen, geringer Einfluss von Rückkopplungen

Quantifying the impact of ocean acidification on our future climate³⁵

Ozeanversauerung im Zusammenhang mit Klimawandeln in der Zukunft durch Nutzung von verschiedenen Modellen (ESM, CMIP5,...) untersucht; bis 2100 sind signifikante Änderungen der OA; Zentrales Ergebnis dieser Studie: OA verändert den gesamten im Ozean gespeicherten Kohlenstoff nicht signifikant.

Blogrecherche:

Das Jahr nach dem Ausbruch des Tambora wird «das Jahr ohne Sommer» genannt³⁶.

Ozeandüngung, ein Ansatz, bei dem Nährstoffe in Ozeane eingetragen werden, damit die Biomasseproduktion steigt und somit mehr CO₂ aus der Luft gefangen wird, hat nicht absehbare Konsequenzen für unsere Ökosysteme³⁷.

Sonnenstrahlung kann durch Sulfatpartikel zurückgestreut werden und somit kann der Erderwärmung entgegengesteuert werden. Die Partikel dienen als Kondensationskeime für die Wolkenbildung, wodurch die Niederschlagsmustern sich verändern und die Wolkenalbedo erhöht wird. Vulkanausbrüche können dazu dienen, Modelle zu entwickeln und zu testen³⁸.

Geoengineering sind verschiedene Methoden, die das Klima beeinflussen können, ohne die Emissionen von Kohlendioxid aktiv zu verringern. Beispiele sind die Ablenkung von Sonnenstrahlen durch Satellitenspiegeln in der Erdumlaufbahn oder durch die Injektion von kleineren Partikeln im oberen Bereich der Atmosphäre. Spiegel im All haben nicht abschätzbare Folgen³⁹.

Die verschiedenen Methoden eignen sich oftmals, um die globalen Temperaturen zu reduzieren und die Auswirkungen durch erhöhte Temperatur zu mildern. Jedoch wirken diese nicht der Senkung des Ozean-pH entgegen. Nebeneffekte von Schwefelinjektionen könnten bspw. der Ozonabbau oder veränderte Niederschlagsmuster sein⁴⁰.

Klimaneutral bedeutet, dass gleich viele Treibhausgase ausgestossen, wie auch wieder eingefangen werden. Dies kann durch natürliche Senken, wie den Ozean oder die Biosphäre, oder durch CDR-Technologien (engl.: carbon dioxide removal), die momentan allerdings noch nicht ausreichend entwickelt sind. Um Klimaneutralität zu erreichen, braucht es strukturelle Änderungen des Energiesektors, des Verkehrs und des Ernährungssystems⁴¹.

Literaturliste

1. Ruela, R., Sousa, M. C., deCastro, M. & Dias, J. M. Global and regional evolution of sea surface temperature under climate change. *Glob. Planet. Change* **190**, (2020).
2. Feely, R. A. *et al.* Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* (80-.). **305**, 362–366 (2004).
3. Siegenthaler, U. & Sarmiento, J. L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* vol. 365 119–125 (1993).
4. Takahashi, T. *et al.* Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **49**, 1601–1622 (2002).
5. Le Quéré, C. *et al.* Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change. *Science* (80-.). **316**, 1735–1738 (2007).
6. Sarmiento, J. L., Hughes, T. M. C., Stouffer, R. J. & Manabe, S. *Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming.* (1998).
7. Caldeira, K. & Wickett, M. E. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res.-Oceans* **110**, C09S04 (2005).
8. McKinley, G. A. *et al.* Timescales for detection of trends in the ocean carbon sink. *Nature* **530**, (2016).
9. Li, H., Ilyina, T., Müller, W. A. & Landschützer, P. Predicting the variable ocean carbon sink. *Sci. Adv.* **5**, eaav6471 (2019).
10. Heinze, C. The role of the ocean carbon cycle in climate change. *Eur. Rev.* **22**, 97–105 (2014).
11. Kwon, E. Y., Primeau, F. & Sarmiento, J. L. The impact of remineralization depth on the air-sea carbon balance. *Nat. Geosci.* **2**, 630–635 (2009).
12. Jiao, N. *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology* vol. 8 593–599 (2010).
13. Riebesell, U. *Ocean acidification. Encyclopedia of Earth Sciences Series* vol. Part 2 (2016).
14. Findlay, H. S. & Turley, C. Chapter 13 - Ocean acidification and climate change. in *Climate Change (Third Edition)* 251–279 (Elsevier, 2021). doi:10.1016/B978-0-12-821575-3.00013-X.
15. Riebesell, U. & Schulz, K. *Auswirkungen der Ozeanversauerung auf marine Lebensprozesse.* (2011).
16. Kurihara, H. Effects of CO₂-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **373**, 275–284 (2008).
17. Dutkiewicz, S. *et al.* Impact of ocean acidification on the structure of future phytoplankton communities. *Nat. Clim. Chang.* **5**, 1002–1006 (2015).
18. Rosa, R., Rummer, J. L. & Munday, P. L. Biological responses of sharks to ocean acidification. *Biol. Lett.* **13**, 20160796 (2017).
19. Anthony, K. R. N., Kline, D. I., Diaz-Pulido, G., Dove, S. & Hoegh-Guldberg, O. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **105**, 17442 LP – 17446 (2008).
20. Hoegh-Guldberg, O., Pendleton, L. & Kaup, A. People and the changing nature of coral reefs. *Regional Studies in Marine Science* vol. 30 100699 (2019).
21. Pendleton, L. *et al.* The Great Barrier Reef: Vulnerabilities and solutions in the face of ocean acidification. *Regional Studies in Marine Science* vol. 31 (2019).
22. Casey, K. S. & Cornillon, P. Global and Regional Sea Surface Temperature Trends. *J. Clim.* **14**, (2001).
23. Mora, C. *et al.* The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature* **502**, 183–187 (2013).

24. Gruber, N. *et al.* Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO₂. *Global Biogeochem. Cycles* **23**, n/a-n/a (2009).
25. Pratchett, M. S., Wilson, S. K., Berumen, M. L. & McCormick, M. I. Sublethal effects of coral bleaching on an obligate coral feeding butterflyfish. *Coral Reefs* **23**, 352–356 (2004).
26. Weir, T., Dovey, L. & Orcherton, D. Social and cultural issues raised by climate change in Pacific Island countries: an overview. *Reg. Environ. Chang.* **17**, 1017–1028 (2017).
27. Tapsuwan, S. & Rongrongmuang, W. Climate change perception of the dive tourism industry in Koh Tao island, Thailand. *J. Outdoor Recreat. Tour.* **11**, 58–63 (2015).
28. Le Quere, C. *et al.* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci.* **2**, 831–836 (2009).
29. Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P. & White, J. W. C. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* **488**, 70–74 (2012).
30. Behrenfeld, M. J. *et al.* Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* **444**, 752–755 (2006).
31. Biastoch, A. *et al.* Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification. *Geophys. Res. Lett.* **38**, (2011).
32. He, X. *et al.* Sea ice in the Arctic Ocean: Role of shielding and consumption of methane. *Atmos. Environ.* **67**, 8–13 (2013).
33. Lauvset, S. K. *et al.* Processes Driving Global Interior Ocean pH Distribution. *Global Biogeochem. Cycles* **34**, 1–17 (2020).
34. McNeil, B. I. & Matear, R. J. Projected climate change impact on oceanic acidification. *Carbon Balance Manag.* **1**, (2006).
35. Matear, R. J. & Lenton, A. Quantifying the impact of ocean acidification on our future climate. *Biogeosciences* **11**, (2014).
36. Tambora und das Jahr ohne Sommer: Wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte - Wolfgang Behringer - Google Books. https://books.google.ch/books?hl=de&lr=&id=dM-YCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=tambora&ots=qAOKBAelsb&sig=SPCN-fzMUgLDYIR3WrTcyvrz5pk&redir_esc=y#v=onepage&q=tambora&f=false.
37. Lampitt, R. S. *et al.* Ocean fertilization: A potential means of geoengineering? *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **366**, 3919–3945 (2008).
38. Crutzen, P. J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* vol. 77 211–220 (2006).
39. Urpelainen, J. Geoengineering and global warming: a strategic perspective. (2012) doi:10.1007/s10784-012-9167-0.
40. Millard-Ball, A. The Tuvalu Syndrome Can geoengineering solve climate's collective action problem? *Clim. Change* **110**, 1047–1066 (2012).
41. Der Bundesrat Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? doi:10.1038/d41586-019-03595-0.

11.04.2021