

Ozeane als Senke für anthropogenes CO₂



(aus Bild der Wissenschaft: Wie viel CO₂ schlucken die Ozeane? 15. März 2019)

Dr. Hans Jürgen Wernicke

7. 12. 2022

Die Weltmeere sind der größte Kohlenstoffspeicher der Erde und einer der wichtigsten Puffer für klimatische Veränderungen der Atmosphäre. Die Ozeane enthalten geschätzt eine Masse von 38.000 Gigatonnen Kohlenstoff, 16 Mal mehr als in der Landbiosphäre ¹.

Sie sind in der Lage, über den natürlichen Austausch hinaus große Mengen der anthropogenen CO₂-Emissionen zu absorbieren und zu speichern. Man schätzt, dass in den Jahren 1994 bis 2007 ca. 30% dieser CO₂-Emissionen von den Weltmeeren aufgenommen wurden. Dies entspricht 34 +/- 4 Gigatonnen CO₂ pro Jahr, im Jahresmittel jährlich bis zu 3,6 +/- 0,3 Gigatonnen CO₂ ².

Abb. 1 ³ und 2 ⁴ zeigen vereinfacht die weltweiten Meeresströmungen und die regionale Verteilung des CO₂-Austausches mit der Atmosphäre.

Die CO₂-Aufnahme findet hauptsächlich in den kälteren Regionen des Nordatlantik und -pazifik und in den oberen Wasserschichten auf Grund der höheren physikalischen Löslichkeit und des Gasaustausches statt. In den wärmeren, eher tropischen Regionen wird dagegen CO₂ an die Atmosphäre abgegeben.

Hierbei spielen CO₂-Partialdruck, Temperatur, in geringerem Maß die Salinität sowie Wasserschichtungen und -strömungen eine wichtige, aber in weiten Bereichen noch nicht erforschte, komplexe Rolle.

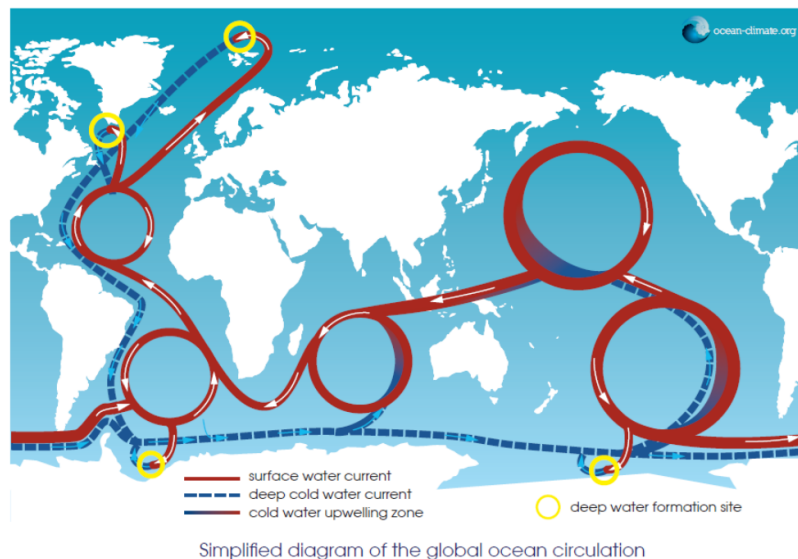


Abb.1 Globale Meeresströmungen ³

¹ www.worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor1/WOR1_de_Kapitel_2, (2010), accessed 7.12.2022

² N.Gruber et al, "The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007", Science, Vol. 363, 1193-1199, (2019)

³ www.ocean-climate.org, Fact Sheets, International Ocean & Climate Initiatives Alliance, accessed 22.11.2022

⁴ www.cdmare.de, Fact Sheet "Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf", CDMare Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), Grafik: IPCC WGI AR6, Kap.5, accessed 22.11.2022

Netto Kohlendioxid-Fluss zwischen Atmosphäre und Meer im Zeitraum von 1994 bis 2007

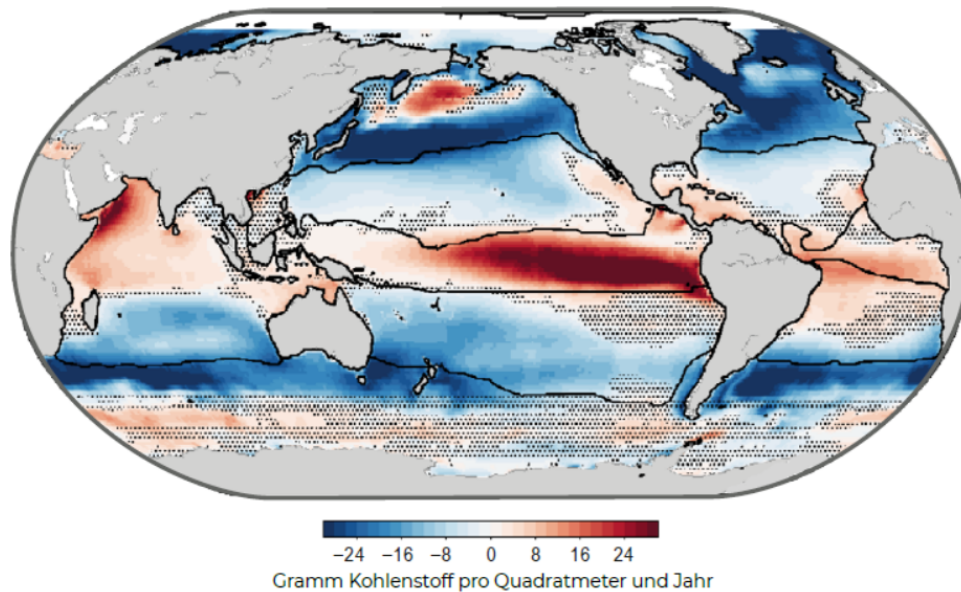


Abb.2 Regionale CO₂-Aufnahme bzw. -Abgabe der Ozeane ⁴

Für den Beobachtungszeitraum 1994 – 2007 zeigen unterschiedliche Modelle in Tab. 1 eine gute Übereinstimmung der bilanzierten CO₂-Mengen ^{1 5}.

	Atlantic	Pacific	Indian	Other regions	Global
Cumulative CO ₂ uptake through surface (-ve is into ocean) July 1994 to June 2007 (PgC, $\pm 2\sigma$)					
North	-5.68 $\pm$ 0.97	-6.60 $\pm$ 0.90	+1.16 $\pm$ 0.43	-1.56 $\pm$ 0.8	-12.7 $\pm$ 1.6
South	-3.22 $\pm$ 0.91	-3.43 $\pm$ 4.6	-7.41 $\pm$ 0.96	-	-14.1 $\pm$ 4.6
Total	-8.91 $\pm$ 1.50	-10.04 $\pm$ 4.3	-6.25 $\pm$ 1.20	-	-26.8 $\pm$ 3.4
Gruber et al. ¹⁷ estimates of inventory increase 1994–2007 (PgC)					
North	6.0 $\pm$ 0.4	5.2 $\pm$ 0.6	0.8 $\pm$ 0.4	1.5 $\pm$ 0.6	13.5 $\pm$ 1.0
South	5.9 $\pm$ 1.2	8.0 $\pm$ 1.2	6.3 $\pm$ 3.4	-	20.1 $\pm$ 3.8
Total	11.9 $\pm$ 1.3	13.2 $\pm$ 1.3	7.1 $\pm$ 3.4	-	33.7 $\pm$ 4.0

Tab1 Aufnahme von anthropogenem Kohlenstoff in den Jahren 1994-2007 in zwei Bilanzierungsmodellen, 1 Pg C entspricht 3,66 pG CO₂ ^{1 5}

Die Quantifizierung und Fortschreibung der CO₂-Aufnahme mit zunehmendem CO₂-Gehalt der Atmosphäre, also zunehmendem CO₂-Partialdruck, ist von vielen Parametern wie z.B. Temperatur,

es

⁵ A. J. Watson et al, „Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory”, Nat Commun 11, 4422 (2020).

Salzgehalt, pH-Wert, der biologischen Vielfalt unter Wasser sowie Meeresströmungen und -schichtungen abhängig und daher schwierig zu quantifizieren.

Dennoch zeigen verschiedene Modelle die weitere Entwicklung der jährlichen CO₂-Aufnahme bis zum Jahr 2018 relativ konsistent, Abb. 3⁴. Der rote Bereich zeigt den Durchschnitt der Jahre 1994 – 2007 (siehe Tab. 1), die schwarze Linie einen Konsensbereich diverser Modelle, die unterbrochenen Linien zwei andere Berechnungen.

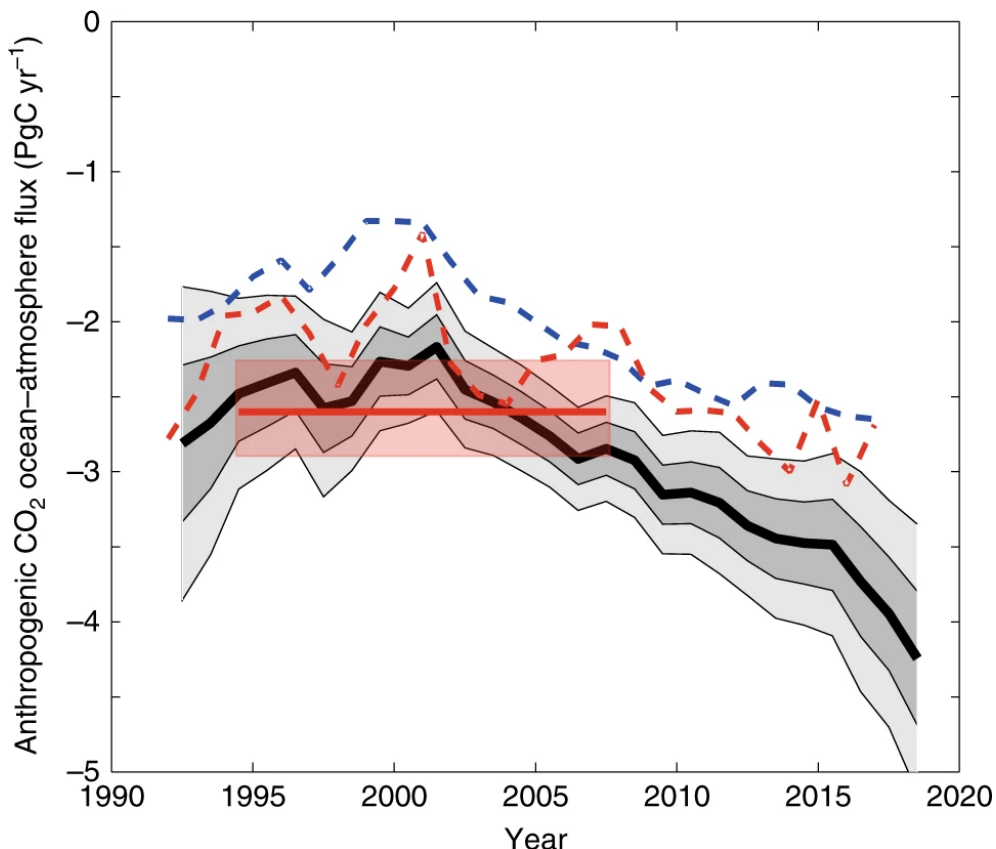


Abb. 3 Entwicklung der anthropogenen CO₂-Aufnahme bis 2018 auf Basis verschiedener Rechenmodelle⁵
(1 Petagramm Kohlenstoff entspricht 1 Gigatonne Kohlenstoff oder 3,66 Gigatonnen CO₂)

Übereinstimmend ergibt sich ein Trend zunehmender Aufnahme des anthropogenen CO₂, der wohl mit dem zunehmenden CO₂-Partialdruck in Zusammenhang steht. Der gegenläufige Effekt einer verminderten CO₂-Löslichkeit bei steigenden Wassertemperaturen wird hierbei wohl überkompensiert, da durch die hohe Wärmekapazität der Ozeane die Änderung der Wassertemperatur langsamer eintritt als die Erhöhung des CO₂-Gehalts bzw. -Partialdrucks der Atmosphäre.

Mit allen Unsicherheiten der Modelle liegt die jährliche CO₂-Aufnahme bei einer Größenordnung von 3-4 Gigatonnen Kohlenstoff bzw. 10-14 Gigatonnen CO₂. Wie lange der Trend einer zunehmenden CO₂-Aufnahme anhält, ist allerdings derzeit nicht voraussagbar.

Mechanismus der natürlichen Speicherung von CO₂ in den Ozeanen:

Bis zu einer Wassertiefe von mehreren hundert Metern ist CO₂ trotz des mit der Tiefe zunehmenden Wasserdrucks gasförmig und löst sich bis zur Sättigung in Wasser auf. In einer Tiefe von ca. 500 bis 2700 m ist CO₂ flüssig, hat aber immer noch eine geringere Dichte als das umgebende Salzwasser, steigt also bei Übersättigung ebenfalls auf. In Wassertiefen über 3000 m hat das flüssige CO₂ eine höhere Dichte als das umgebende Salzwasser und würde bei entsprechender Menge auf dem Meeresgrund „CO₂-Teiche“ bzw. „-Seen“ bilden. Je nach Temperatur und Salzgehalt ist bei geringeren Tiefen auch die Bildung von festen CO₂-Hydraten möglich. Die Bildung von Hydraten in tiefen Schichten ist je nach Umgebungsbedingungen reversibel, Hydrate sind also keine nachhaltigen CO₂-Speicher.

Das Phasendiagramm des Systems (reines) Wasser/ CO₂ in Abhängigkeit von Druck und Temperatur zeigt Abb. 4 ⁶

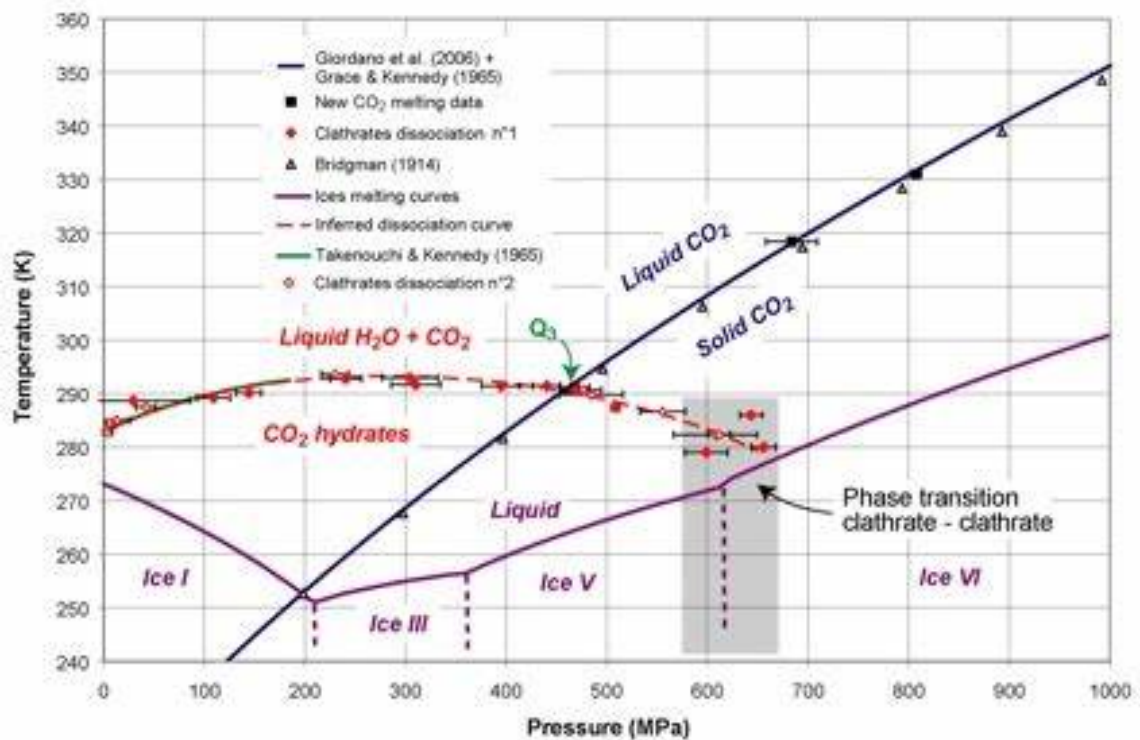


Abb. 4 Phasendiagramm von CO₂ in Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur ⁶

⁶ www.nai.nasa.gov/annual-reports/2010/jpl-icy-worlds/habitability-of-icy-world, accessed 7.12.2022

Der Einfluss des Salzgehalts in Meerwasser ist gegenüber dem Einfluss von Wassertemperatur und CO₂-Partialdruck eher von untergeordneter Bedeutung, Tab 2 ⁷.

Cl ‰	<i>t</i> , °C				
	0.7	4.0	10.2	20.0	30.0
0	750.1	660.3	530.2	391.1	299.7
10.0			486.3		
20.0		552.6	448.2	335.9	261.4
29.0		508.6	416.2	313.8	246.3
0.6413 m NaCl		554.7		335.8	261.8

Tab. 2 Löslichkeitskonstanten von CO₂ in Wasser, NaCl-Lösungen und Seewasser (10⁻⁴ mol/Liter und atm) ⁷

Da die Wassertiefen der Ozeane zu über 70% über 3000 m betragen, ergibt sich ein riesiges Potential zur CO₂-Speicherung von rechnerisch 4.000 bis 10.000 Gigatonnen ⁸, wobei sich durch die damit verbundene Absenkung des p_H-Werts drastische Konsequenzen für alle marinen, insbesondere die skelettbildenden Organismen wie z.B. Korallen, Meeresschnecken und Muscheln ergeben würden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Speichermechanismen, die „physikalische und die biologische Pumpe“, siehe Abb. 5 ⁹. Die Speichermengen werden von einem so genannten „chemischen Puffer“ und einem „biologischen Puffer“ über die rein physikalische Löslichkeit von CO₂ hinaus beeinflusst.

Sowohl die Bildung von anorganischen Sedimenten in Form von Karbonaten als auch die durch Photosynthese gebildete, verrottende und sedimentierende Biomasse tragen zu einer dauerhaften CO₂-Speicherung bei.

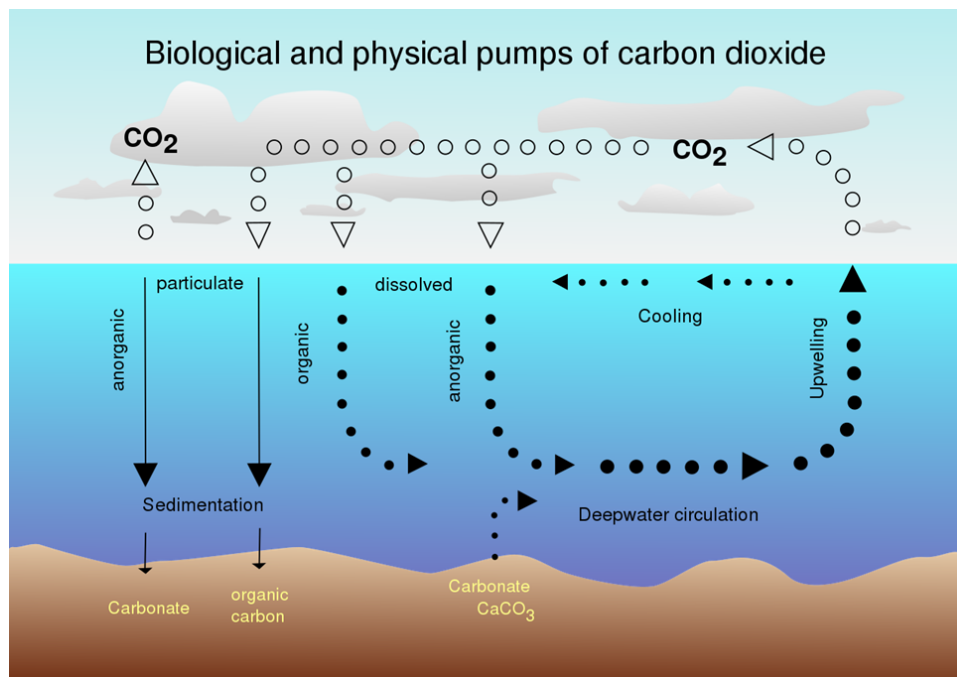
Die CO₂-Aufnahme durch die physikalische Löslichkeit im Meerwasser hängt nicht nur vom CO₂-Partialdruck (also dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre) und der Wassertemperatur ab, sondern auch vom pH-Wert und in geringerem Ausmaß vom Salzgehalt des Meerwassers ab.

Kaltes Wasser in den unteren Meeresschichten löst mehr Kohlenstoffdioxid, gleichzeitig steigt die Dichte des kälteren Wassers und bewirkt, dass das CO₂-reichere Wasser in tiefere Schichten absinkt. Dies ist jedoch auf Grund von Meeresströmungen und damit verbundenem Wasseraustausch nur ein reversibler Effekt.

⁷ Y.H.Li et al, „The Solubility of CO₂ in Water and Seawater, J. of Geophysical Research Atmospheres 76, p. 4203-4207 (1971)

⁸ D.Hume, „Ocean Storage of CO₂“, The Maritime Executive, 29.7.2018

⁹ www.worldbank.org/en/news/feature/2022/02/08/what-you-need-to-know-about-oceans-and-climate-change, accessed 22.11.2022

Abb.5 CO₂-Speicherung in den Ozeanen ⁹

Für alle Gase gilt, dass deren Löslichkeit mit zunehmender Temperatur und steigendem Salzgehalt abnimmt, aber mit zunehmendem Druck ansteigt.

Die CO₂-Löslichkeit in Wasser ist um zwei Größenordnungen höher als zum Beispiel die von Sauerstoff, siehe Tab. 3 ¹⁰ und Abb. 6 ¹¹.

Wasser-Temperatur (°C)	0	20	30	40	50
Sauerstoff	0,0694	0,0432	0,0308	0,0227	0,0138
CO ₂	3,35	1,69	0,97	0,58	

Tab.3 Löslichkeit (g/kg) von CO₂ und von Sauerstoff in Wasser bei 1013 mbar ¹⁰

¹⁰ www.chemie.schule/k7/k7ab/loeslichkeit-gase, accessed 24.11.22

¹¹ H. Lohninger, Anorganische Chemie, www.anorganik.chemie.vias.org/kohlendioxid

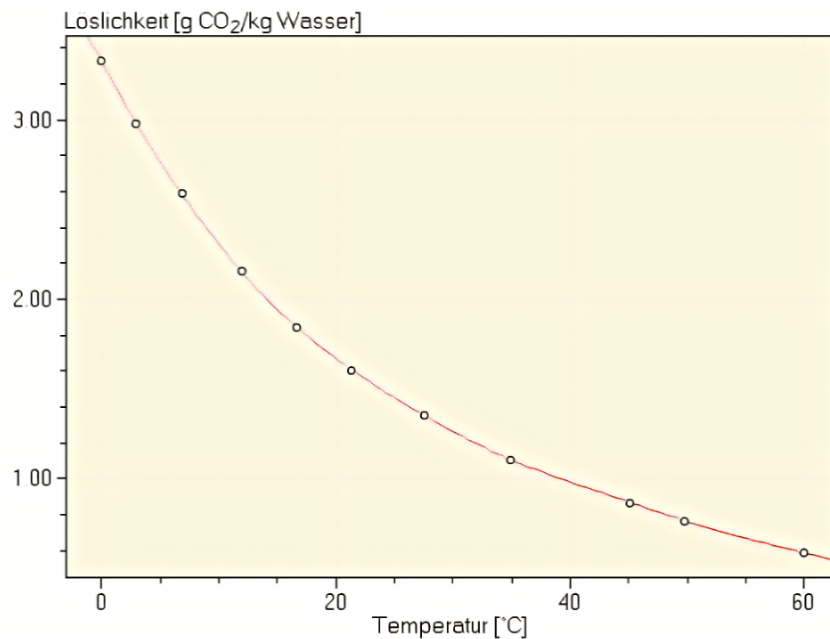


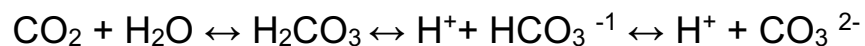
Abb.6 CO₂-Löslichkeit in (reinem) Wasser bei Normaldruck in Abhängigkeit von der Wassertemperatur ¹¹

Chemischer und Biologischer Puffer:

Chemischer Puffer:

Das im Meerwasser gelöste CO₂ liegt zu über 90% als Hydrogenkarbonat, zu ca. 8% als Karbonat und nur zu ca. 1% als physikalische CO₂-Lösung vor.

Der gelöste anorganische Kohlenstoff liegt im Ozean überwiegend, d.h. zu 91%, als Hydrogenkarbonat vor, daneben zu 8% als Karbonat und zu 1% als physikalisch gelöstes CO₂. Das zwischen diesen Komponenten bestehende chemische Gleichgewicht



wird durch weitere CO₂-Aufnahme verschoben, d.h. führt durch Reaktion von CO₂ mit Karbonat zur zusätzlichen Bildung von Hydrogenkarbonat mit dem Effekt einer abnehmenden CO₂-Aufnahmekapazität und Absenkung des pH-Werts (Versauerung). Nebeneffekt ist die Schädigung der Skelettbildung (Kalziumcarbonat) von Meeresorganismen.

Biologischer Puffer

Das im Ozean gelöste atmosphärische Kohlendioxid wird aber nicht nur chemisch verwandelt, sondern auch in den oberen Wasserschichten durch die Photosynthese des Phytoplanktons gebunden. Der Kohlenstoff wird dabei in Form von Kohlendioxid oder Hydrogenkarbonat aufgenommen. Das verringert den Partialdruck von CO₂ in der oberen Wasserschicht und fördert damit die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Die Bruttoprimärproduktion durch das ozeanische Phytoplankton wird auf 103 Gt C pro Jahr geschätzt, die Veratmung (autotrophe Respiration) auf 58 Gt C und die Nettoprimärproduktion entsprechend auf 45 Gt C pro Jahr. Der daraus resultierende und im Phytoplankton gebundene organische Kohlenstoff wird vom Zooplankton konsumiert, wobei durch heterotrophe Respiration 34 Gt C pro Jahr wieder freigesetzt werden. Der Rest wird direkt oder indirekt zu sedimentierendem Abfall ¹².

CO₂-Aufnahme durch küstennahe Vegetation:

Ein zusätzliches Potential zur CO₂-Aufnahme und Bindung stellen Salzmarschen, Mangrovenwälder, Seegraswiesen sowie Tang- und Kelpwälder dar. Sie machen inklusive der Gezeitenzonen ca. 0,2% der Meeresoberfläche aus und vermögen im Vergleich zu Regenwäldern flächenbezogen die 5 – 30-fache Menge an Kohlenstoff zu binden.

Salzmarschen erstrecken sich auf ca. 60.000 km² und können pro Hektar 28 -17.000 kg jährlich Kohlenstoff binden. (Der große Bereich erklärt sich durch regionale Verhältnisse, Tidenhub und klimatischem Umfeld.

Mangrovenwälder umfassen 170.000 km² (fast die Hälfte der Fläche Deutschlands) und können pro Hektar jährlich 560-11.000 kg Kohlenstoff binden.

Seegraswiesen umfassen 317.000 km² (ca. 90% der Fläche Deutschlands) und können jährlich 25-1000 kg Kohlenstoff pro Hektar einlagern (bei 500 kg/ha rechne ich 0,016 Gt/a).

Seetangwälder erstrecken sich auf 3,4 Mio km² (9-fache Fläche Deutschlands) mit einem noch unbekannten, aber sicher erheblichen Bindungspotential für Kohlenstoff.

(alle vorstehenden Angaben aus CDMare Fact Sheet Küstenökosysteme¹³)

¹² 7. IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge and New York 2001, entnommen aus: www.bildungsserver.hamburg.de/treibhausgase/2055556/kohlenstoffkreislauf-ozean-artikel/, accessed 7.12.2022

¹³ www.cdmare.de/wp-content/uploads/2022/09/CDMare_Kuestenoekosysteme_factsheet_220902 „Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres“, accessed 5.Dec.2022

Die küstennahen Regionen sind demnach ein zwar kleinerer, aber dennoch unverzichtbarer CO₂-Speicher mit einem aus vorgenannten Schätzungen errechneten, ungefähren Aufnahmepotential von bis zu 0,9 Gigatonnen/Jahr zuzüglich des Beitrags der Seetang/Kelp-Wälder.

Künstliche CO₂-Speicher (Ocean Carbon Sequestration – OCR)

Die Ozeane können über ihre natürliche CO₂ – Aufnahme -kapazität hinaus auch als künstliche Speicher dienen (Abb. 7 ¹⁴).

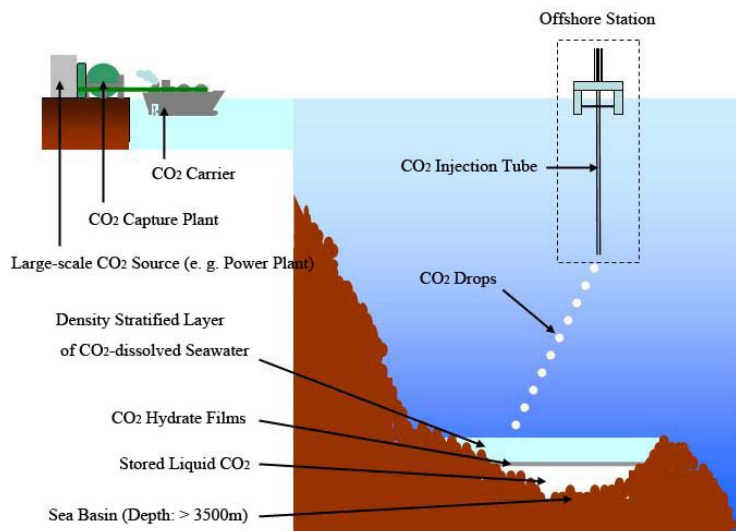


Abb.7 CO₂-Tiefenverpressung im Meer ¹⁴

Die bekannten Carbon Capture and Storage (CCS)–Projekte umfassen bei der Tiefenverpressung von CO₂ die Lagerung von flüssigem CO₂ in entsprechenden Wassertiefen, die Injektion in offshore Öl- und Gaslagerstätten und bei entsprechenden basaltigen Gesteinsformationen auch die Mineralisierung.

So plant die BASF-Tochterfirma Wintershall mit der norwegischen Horisont Energi das Verpressen von ca. 40 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr ¹⁵ im norwegischen Sektor der Nordsee.

Wegen des sehr geringen und langsamen Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Meerwasser, wegen des großen Aufnahmepotentials und wegen erwarteter geringer Auswirkungen durch Versauerung wird auch eine Sequestrierung von CO₂ in Meerestiefen über 4000 m propagiert, aber noch nicht großtechnisch praktiziert. So könnte z.B. der Sunda-Graben

¹⁴ Grafik aus: Y, Nakajima et al, „Development of CO₂ Injection method for CO₂ ocean storage” presented at

AICHE Annual Meeting (San Francisco, CA 11/12-17/2008

¹⁵ Meldung Redaktionsnetzwerk Deutschland, 30.11.2022

geschätzt 19.000 Gigatonnen, der Puerto Rica Graben 24.000 Gigatonnen CO₂ aufnehmen ¹⁶.

Ob eine solche Option trotz des riesigen Potentials jemals auf Akzeptanz trifft, ist auf Grund der fehlenden Kenntnisse über Vorgänge und Langzeitauswirkungen in der Tiefsee unklar.

Fazit

Die jährliche CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane hat mit größenordnungsmäßig 3-4 Gt Kohlenstoff (10-14 Gt CO₂) eine relevante Größenordnung. Eine aktuelle Bilanzierung anthropogener CO₂-Emissionen zeigt, dass die Ozeane ca. 26% der Emissionen aufnehmen, eine ähnliche Größenordnung wie die terrestrische CO₂-Aufnahme (Abb. 8).¹⁷

Die Langzeit-Aufnahmekapazität und damit verbundene negative Effekte auf das Ökosystem der Ozeane sind allerdings schwer vorhersehbar und noch weitgehend unerforscht.

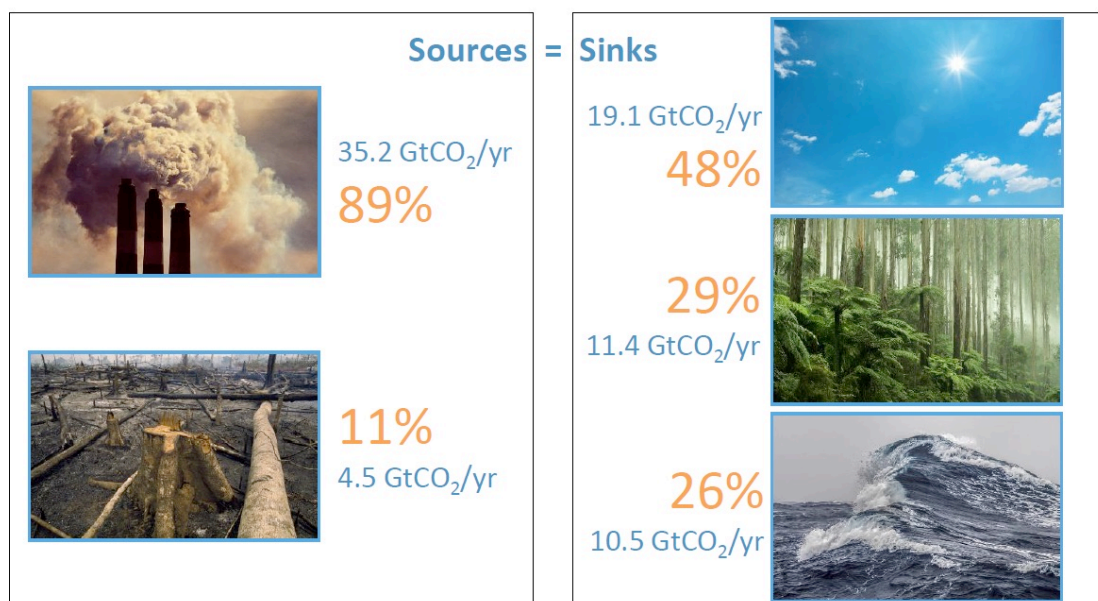


Abb. 8 Bilanz der globalen CO₂-Emission und -Aufnahme im Jahresdurchschnitt 2012 - 20212

¹⁶ S. Goldthorpe, „Potential for Very Deep Ocean Storage of CO₂ Without Ocean Acidification: A Discussion“, Energy Procedia Volume 114, July 2017, p.5417-542, 2017

¹⁷ P.Friedlingstein et al, „Global Carbon Budget 2022“, Earth System Science Data, Vo. 14, issue 11, 4811–4900 (2022)

Ein aktives Verbringen des CO₂ in der Tiefsee unter 3.000 – 4.000 m findet in den ermittelten Größenordnungen bisher keine Berücksichtigung. Es könnte eine erhebliche Chance für CCS (Carbon Capture and Storage) bieten, wenn Langzeiteffekte besser erforscht sind und diese Option gesellschaftlich Akzeptanz findet.

Im Kontext des GES-Modells stellen die Ozeane ein Upscale Potenzial für die im Bereich der terrestrischen natur-basierten Lösungen kalkulierten 10 Mrd. t CO₂ dar.