

Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

Teil 1: Grundelemente zur Vermeidung von Treibhausgasen und Herstellung klimaneutraler Energieträger (technischer Werkzeugkasten)

Stand 08. August 2023

Kapitel 2-11

Autorenteam:	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Christof von Branconi	Simon Göss
Prof. Dr. Estelle Herlyn	Dr. Wilfried Lyhs
Dr. Tobias Orthen	Dr. Ludolf Plass
Dr. Hans-Peter Sollinger	Dr. Jens Wagner
Dr. Hans Jürgen Wernicke	

Erklärung zum Urheberrecht

Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.

Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

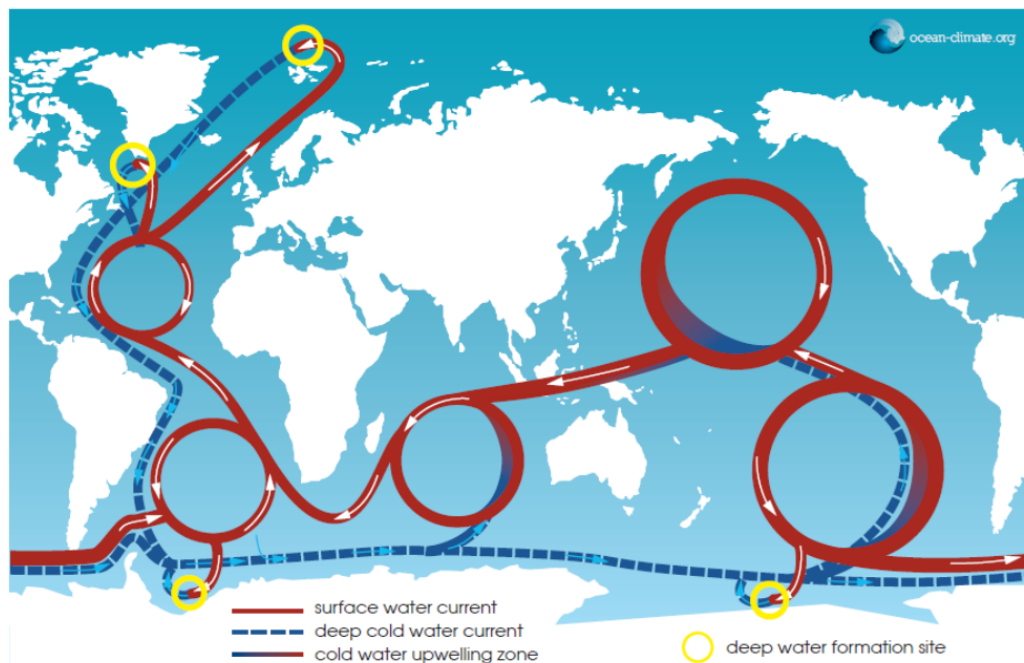
2.11. Ozeane als Senke für anthropogenes CO₂

2.11.1 Einführung

Die Weltmeere sind der größte Kohlenstoffspeicher der Erde und einer der wichtigsten Puffer für klimatische Veränderungen der Atmosphäre.

Sie sind in der Lage, große Mengen der anthropogenen CO₂-Emissionen aufzunehmen 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 Gt CO₂ bzw. durchschnittlich $2,6 \pm 0,3$ Gt CO₂ pro Jahr,⁵²⁸

Abbildung 181⁵²⁹ und Abbildung 182⁵³⁰ zeigen vereinfacht die weltweiten Meeresströmungen und die regionale Verteilung des CO₂-Austausches mit der Atmosphäre.



Simplified diagram of the global ocean circulation

Abbildung 181: Globale Meeresströmungen

Quelle: Ocean-Climate (2022)

⁵²⁸ Vgl. Gruber (2019), Die Durchschnittsbildung ist unklar: $34 \text{ Gt}/13 \text{ Jahre}$ gleich $2,6 \text{ Gt}/\text{Jahr}$, die Bandbreite ist vermutlich $0,3 \text{ Gt}/\text{Jahr}$)

⁵²⁹ Vgl. Ocean-Climate (2022)

⁵³⁰ Vgl. CDRmare (2022)

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

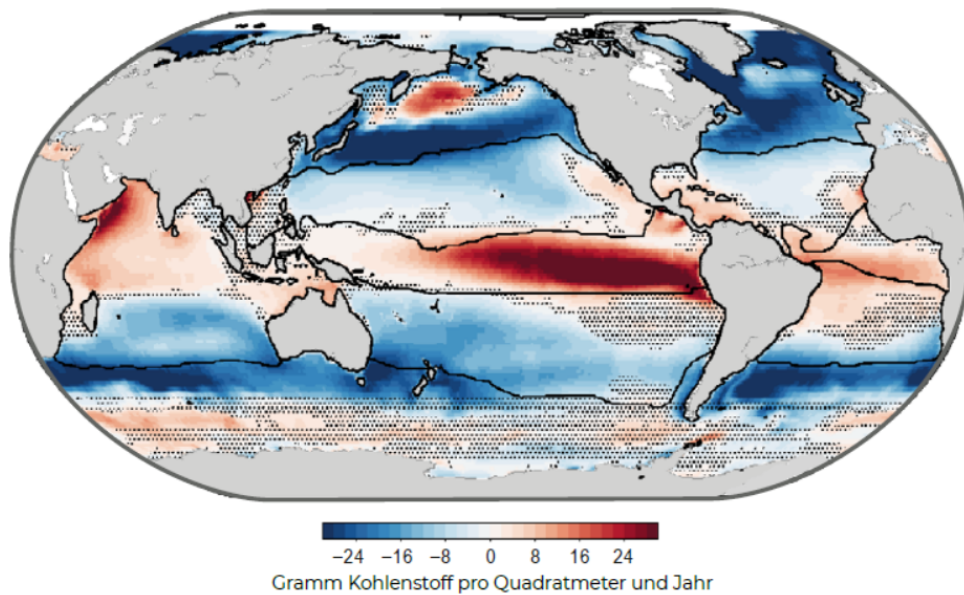


Abbildung 182: Regionale CO₂-Aufnahme bzw. -Abgabe der Ozeane;
Quelle: CDRMare (2022)

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, Salzgehalt, Wasserschichtungen und -strömungen eine wichtige, aber in weiten Bereichen noch nicht erforschte, komplexe Rolle.

Für den Beobachtungszeitraum von 1994 bis 2007 zeigen verschiedene Modellrechnungen in Tabelle 45 eine gute Übereinstimmung mit den aufgenommenen CO₂-Mengen.⁵³¹

Die Quantifizierung und Fortschreibung der CO₂-Aufnahme mit zunehmendem CO₂-Gehalt der Atmosphäre, also des CO₂-Partialdrucks, ist von vielen Parametern wie z.B. Temperatur, Salzgehalt, pH-Wert, der biologischen Vielfalt unter Wasser sowie Meeresströmungen und -schichtungen abhängig und daher schwierig zu berechnen, zu verifizieren und damit auch zu beurteilen.

⁵³¹ Vgl. Watson (2020)

Tabelle 45: von Ozeanen in den Jahren 1994 bis 2007 aufgenommene Mengen CO₂ nach zwei Modellrechnungen, Angaben in PgC (Petagram of Carbon)⁵³²;

Quelle: Gruber (2019)

	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 ± 0.97	-6.60 ± 0.90	$+1.16 \pm 0.43$	-1.56 ± 0.8	-12.7 ± 1.6
South	-3.22 ± 0.91	-3.43 ± 4.6	-7.41 ± 0.96	–	-14.1 ± 4.6
Total	-8.91 ± 1.50	-10.04 ± 4.3	-6.25 ± 1.20	–	-26.8 ± 3.4
Gruber et al. ¹⁷ estimates of inventory increase 1994–2007 (PgC)					
North	6.0 ± 0.4	5.2 ± 0.6	0.8 ± 0.4	1.5 ± 0.6	13.5 ± 1.0
South	5.9 ± 1.2	8.0 ± 1.2	6.3 ± 3.4	–	20.1 ± 3.8
Total	11.9 ± 1.3	13.2 ± 1.3	7.1 ± 3.4	–	33.7 ± 4.0

Dennoch zeigen verschiedene Modelle in Abbildung 183 die weitere Entwicklung der jährlichen CO₂-Aufnahme bis zum Jahr 2018 relativ konsistent.⁵³¹ Der rote Bereich zeigt den Durchschnitt der Jahre 1994 – 2007 (siehe Tabelle 45), die schwarze Linie einen Konsensbereich diverser Modelle, die unterbrochenen Linien zwei andere Berechnungen.

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 in einer Größenordnung von 3–4 Gt Kohlenstoff bzw. 10–14 Gt CO₂. Wie lange der Trend einer zunehmenden CO₂-Aufnahme anhält, ist allerdings derzeit nicht voraussagbar.

⁵³² 1 PgC = 44/12 PgCO₂

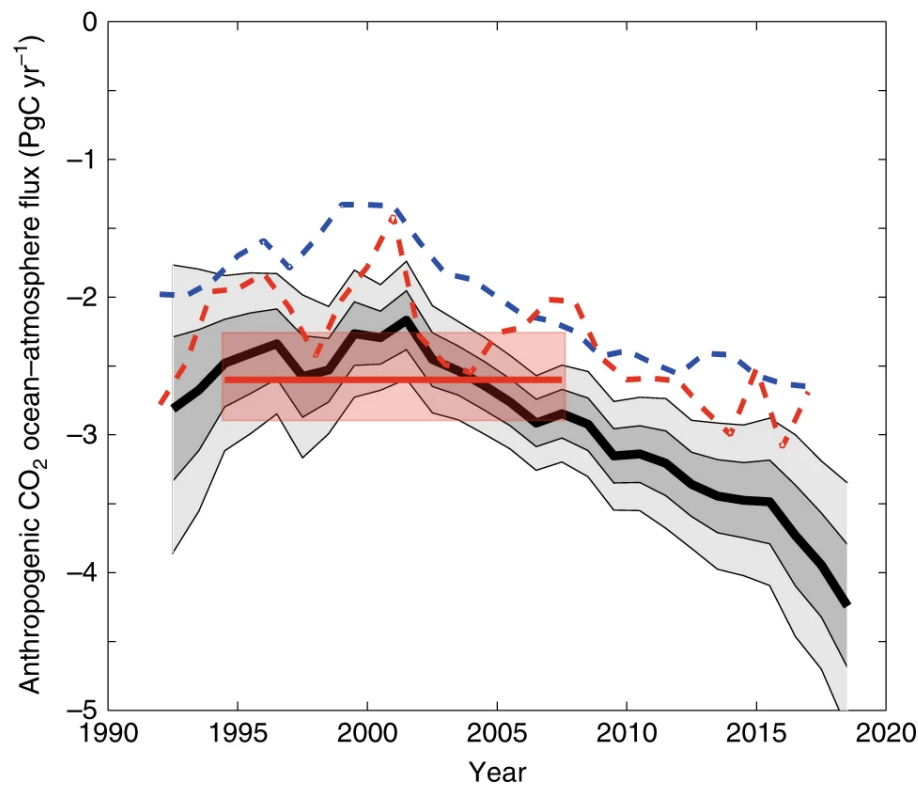


Abbildung 183: Entwicklung der anthropogenen CO₂-Aufnahme bis 2018 auf Basis verschiedener Rechenmodelle (1 PgC Petagramm entspricht 1 Gigatonne); Quelle: Watson et al., 2020

2.11.2 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 2.700 m ist CO₂ flüssig, hat aber immer noch eine geringere Dichte als das umgebende Salzwasser, steigt also bei Übersättigung ebenfalls auf. In Wassertiefen über 3.000 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.⁵³³ Je nach Temperatur und Salzgehalt ist bei geringeren Tiefen 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 Abbildung 184.⁵³⁴ Die Rolle des Salzgehalts im Wasser ist dieser Darstellung nicht zu entnehmen. Allerdings ist der Einfluss des Salzgehalts in Meerwasser gegenüber dem Einfluss von Wassertemperatur und CO₂-Partialdruck eher von untergeordneter Bedeutung, (siehe Tabelle 46).⁵³⁵

⁵³³ Vgl. Hume (2018)

⁵³⁴ Vgl. Nasa (2022)

⁵³⁵ Vgl. Li (1971)

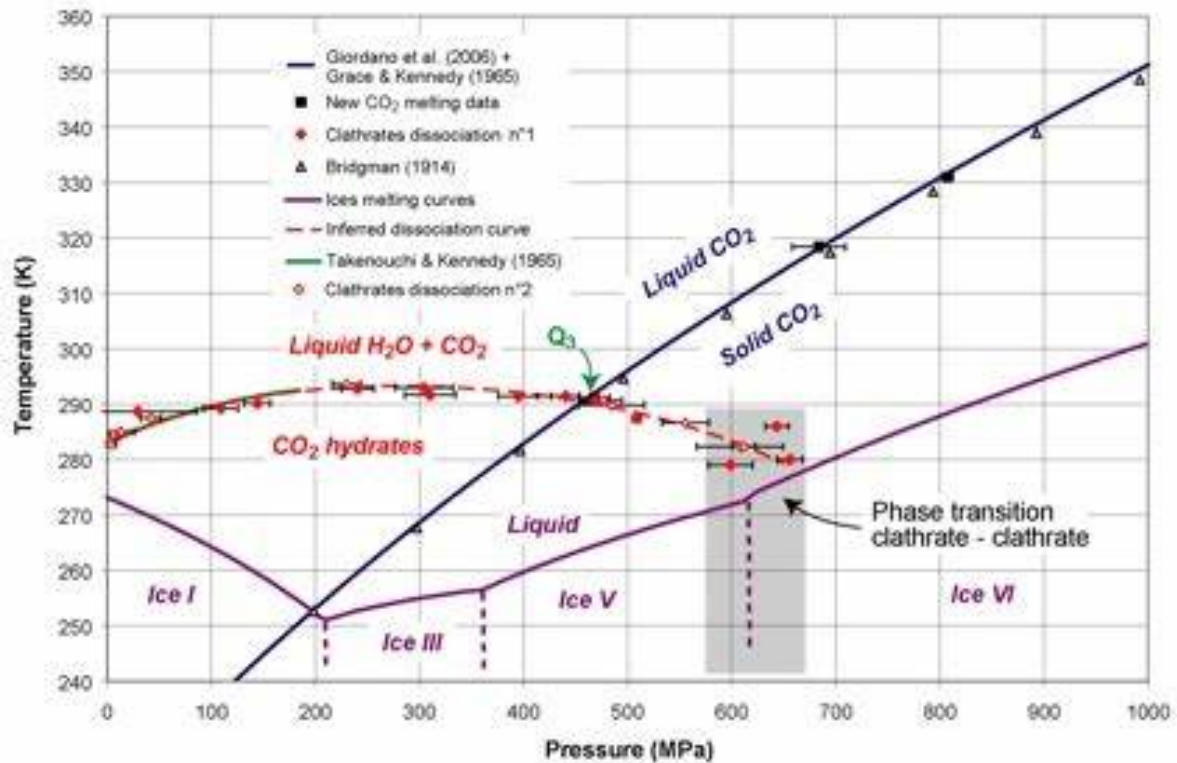


Abbildung 184: Phasendiagramm von CO₂ in Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur;
Quelle: Nasa (2022)

Tabelle 46: Löslichkeitskonstanten von CO₂ in Wasser, NaCl-Lösungen und Seewasser (in 10⁻⁴ mol/Liter/atm); Quelle: Li & Tsui, 1971

Cl ‰	t, °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

Da die Wassertiefen der Ozeane zu über 70 % über 3.000 m betragen, ergibt sich ein riesiges Potenzial zur CO₂-Speicherung von rechnerisch 4.000 bis 10.000 Gt CO₂,⁵³⁶ wobei sich durch die damit verbundene Absenkung des pH-Wertes drastische Konsequenzen für alle marinen Organismen wie z.B. Korallen, Meeresschnecken und Muscheln ergeben würden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Speichermechanismen, die „physikalische und die biologische Pumpe“, siehe Abbildung 185.⁵³⁷ Die Speichermengen werden von einem so genannten „chemischen Puffer“ und einem „biologischen Puffer“ über die rein physikalische Löslichkeit von CO₂ hinaus beeinflusst.

⁵³⁶ Vgl. Hume (2018)

⁵³⁷ Vgl. www.worldbank.org/en/news/feature/2022/02/08/what-you-need-to-know-about-oceans-and-climate-change, zugegriffen am 22.11.2022

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, sondern auch vom pH-Wert und in geringem 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.

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 Tabelle 47⁵³⁸ und Abbildung 186.⁵³⁹

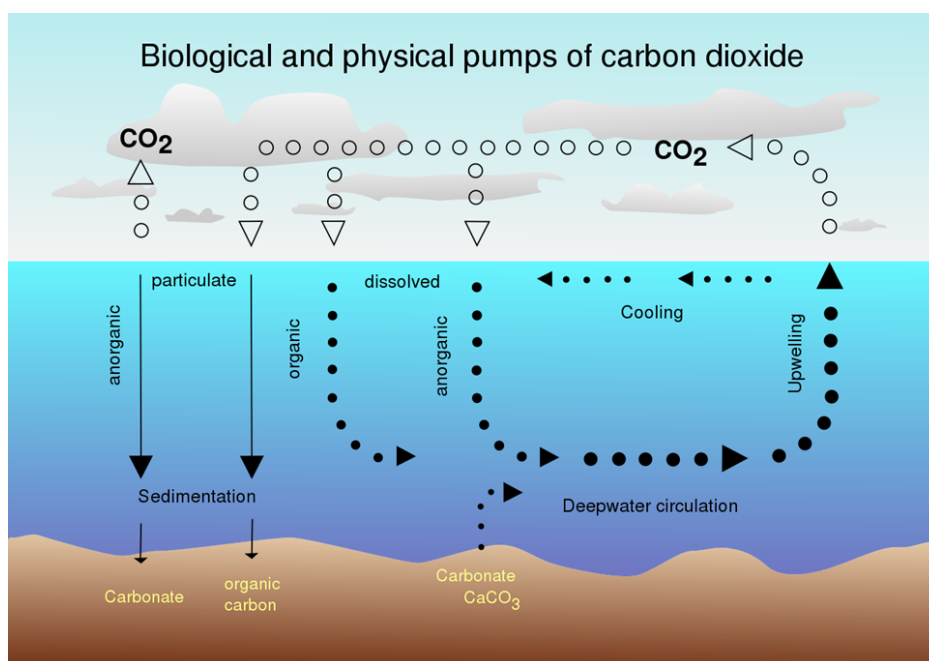


Abbildung 185: Biologische und physikalische Pumpe für die Speicherung von CO₂ in den Ozeanen⁵³⁹

Tabelle 47: Löslichkeit (g/kg) von CO₂ und von Sauerstoff in Wasser bei 1013 mbar

Wassertemperatur (°C)	0	20	30	40	50
Löslichkeit Sauerstoff in g/kg	0,0694	0,0432	0,0308	0,0227	0,0138
Löslichkeit CO ₂ in g/kg	3,35	1,69	0,97	0,58	

⁵³⁸ Vgl. Chemischule (2022)

⁵³⁹ Vgl. Lohninger (o.J.)

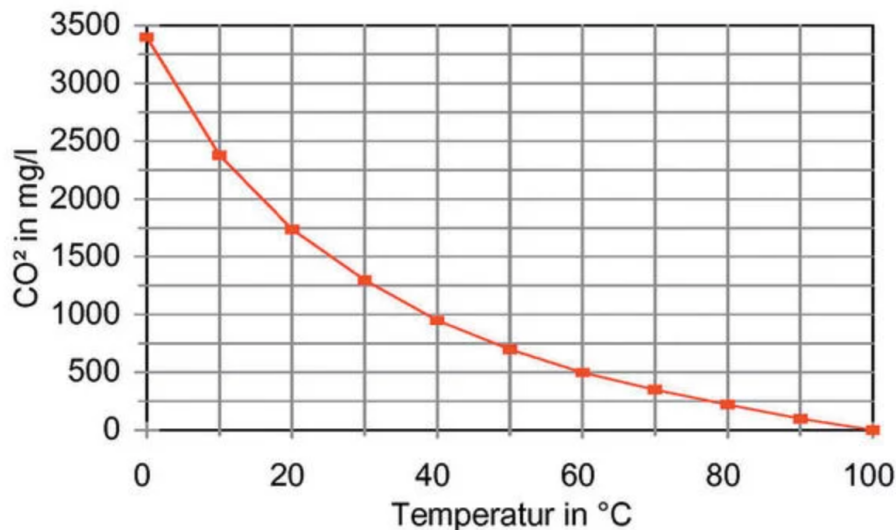


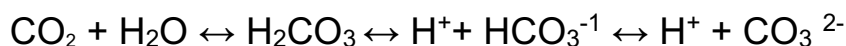
Abbildung 186: CO₂-Löslichkeit in (reinem) Wasser bei Normaldruck in Abhängigkeit von der Wassertemperatur;
 Quelle: <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/kein-schaden-am-kessel/#slider-intro-2>

2.11.3 Chemischer und Biologischer Puffer

2.11.3.1 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 auch die Schädigung der Skelettbildung (Kalziumcarbonat) von Meeresorganismen.

2.11.3.2 Biologischer Puffer

Das in der ozeanischen Deckschicht gelöste atmosphärische Kohlendioxid wird aber nicht nur chemisch verwandelt, sondern auch 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.⁵⁴⁰

2.11.4 CO₂-Aufnahme durch küstennahe Vegetation

Ein zusätzliches Potenzial 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 bei der Kohlenstoffbindung 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. Wieder mit einem mittleren Wert von 500 kg/ha gerechnet ergibt dies eine CO₂-Einlagerung von 0,016 Gt/a.

Seetangwälder erstrecken sich auf 3,4 Mio km² (9-fache Fläche Deutschlands) mit einem noch unbekannten, aber sicher erheblichen Bindungspotenzial für Kohlenstoff. Alle Zahlenangaben stammen aus dem CDMare Fact Sheet Küstenökosysteme.⁵⁴¹

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

2.11.5 Künstliche CO₂-Speicher (Ocean Carbon Sequestration – OCR)

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 Mt CO₂ pro Jahr im norwegischen Sektor der Nordsee.⁵⁴²

⁵⁴⁰ Vgl. IPCC (2001)

⁵⁴¹ Vgl. CDMare (2022a)

⁵⁴² Vgl. Meldung Redaktionsnetzwerk Deutschland, 30.11.2022

Wegen des sehr geringen und langsamen Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Meerwasser, wegen des großen Aufnahmepotenzials und wegen erwarteter geringer Auswirkungen durch Versauerung wird auch eine Sequestrierung von CO₂ in Meerestiefen über 4.000 m propagiert, aber noch nicht großtechnisch praktiziert. So könnte z.B. der Sunda-Graben geschätzt 19.000 Gt, der Puerto Rica Graben 24.000 Gt CO₂ aufnehmen.⁵⁴³

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

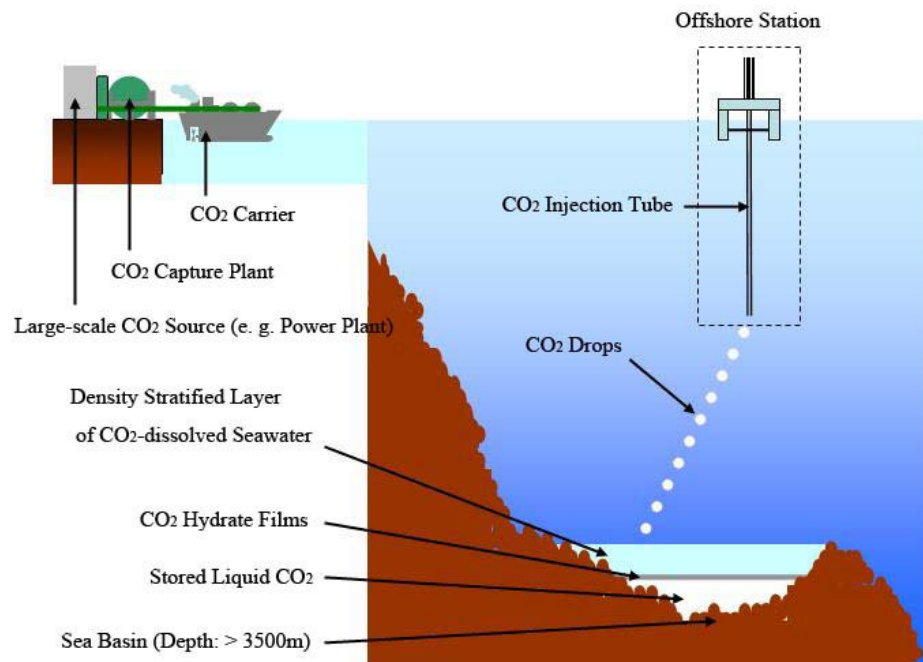


Abbildung 187: CO₂-Tiefenverpressung im Meer

2.11.6 Zusammenfassung

Die jährliche CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane hat mit ca. 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 (siehe Abbildung 188).

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

Ein aktives Verbringen des CO₂ in Tiefen unter 3.000 – 4.000 m findet in den ermittelten Größenordnungen 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.

⁵⁴³ Vgl. Goldthorpe (2017)

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

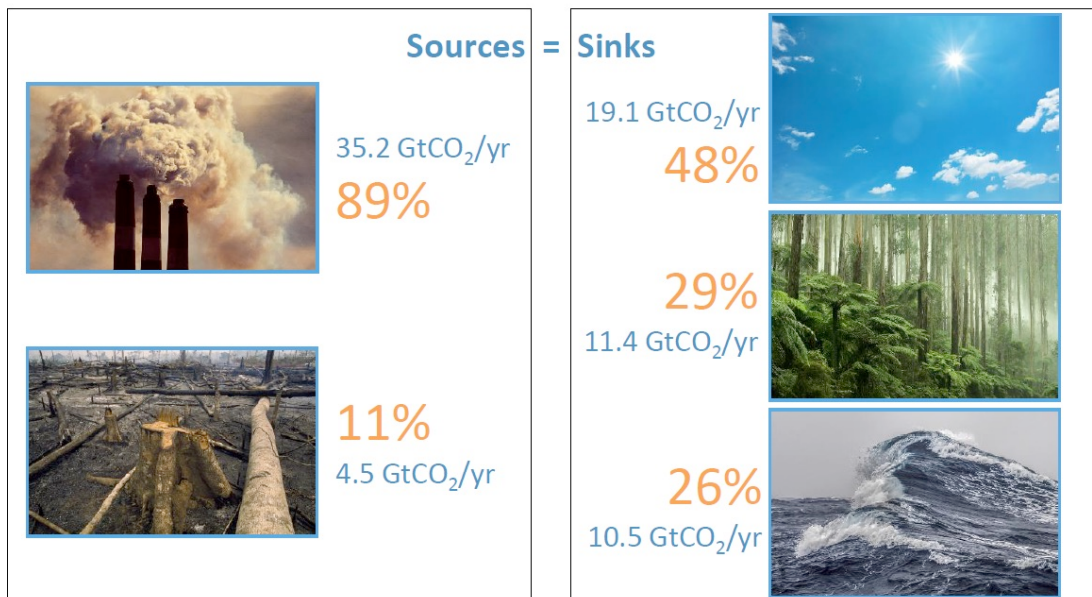


Abbildung 188: Bilanz der globalen CO₂-Emission und -Aufnahme im Jahresdurchschnitt 2012 – 2021;
Quelle: Friedlingstein (2022)