

Vorlesungsreihe: *Umwelt + Wandel*

Erwärmung und **Versauerung**
der Ozeane und Meere


(,Das eine und das andere Kohlendioxid-Problem')

Michael E. Böttcher

**Leibniz IOW, Warnemünde
Geochemie & Isotopen-Biogeochemie**

**Universität Greifswald, Marine Geochemie
Assoc. Universität Rostock, Interdisc. Fakultät**
(Kontakt: michael.boettcher@io-warnemuende.de)

- Unser Planetensystem - Kohlendioxid auf der Erde: Ein Mangel?

	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
Entfernung von der Sonne (in Mio. km)	57,9	108,2	149,6	227,9	778,3	1427	2870	4497
 NASA								
Atmosphären-Komponenten	keine	CO ₂	N ₂ O ₂	CO ₂	H ₂ He	H ₂ He	H ₂ He CH ₄	H ₂ He



Die Erd-Atmosphäre ist heutzutage im physikochemischen Ungleichgewicht mit der Erdoberfläche (← Leben)

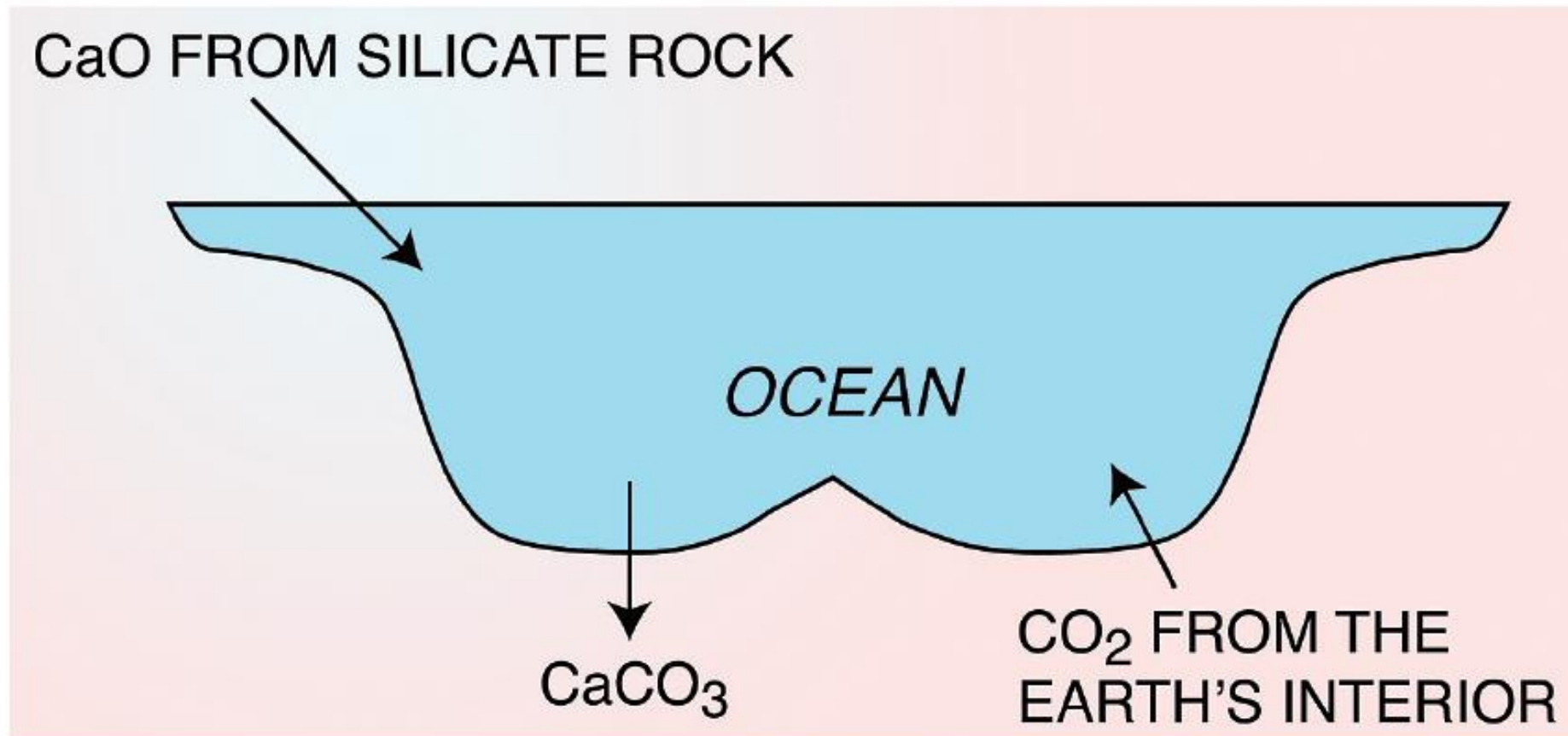
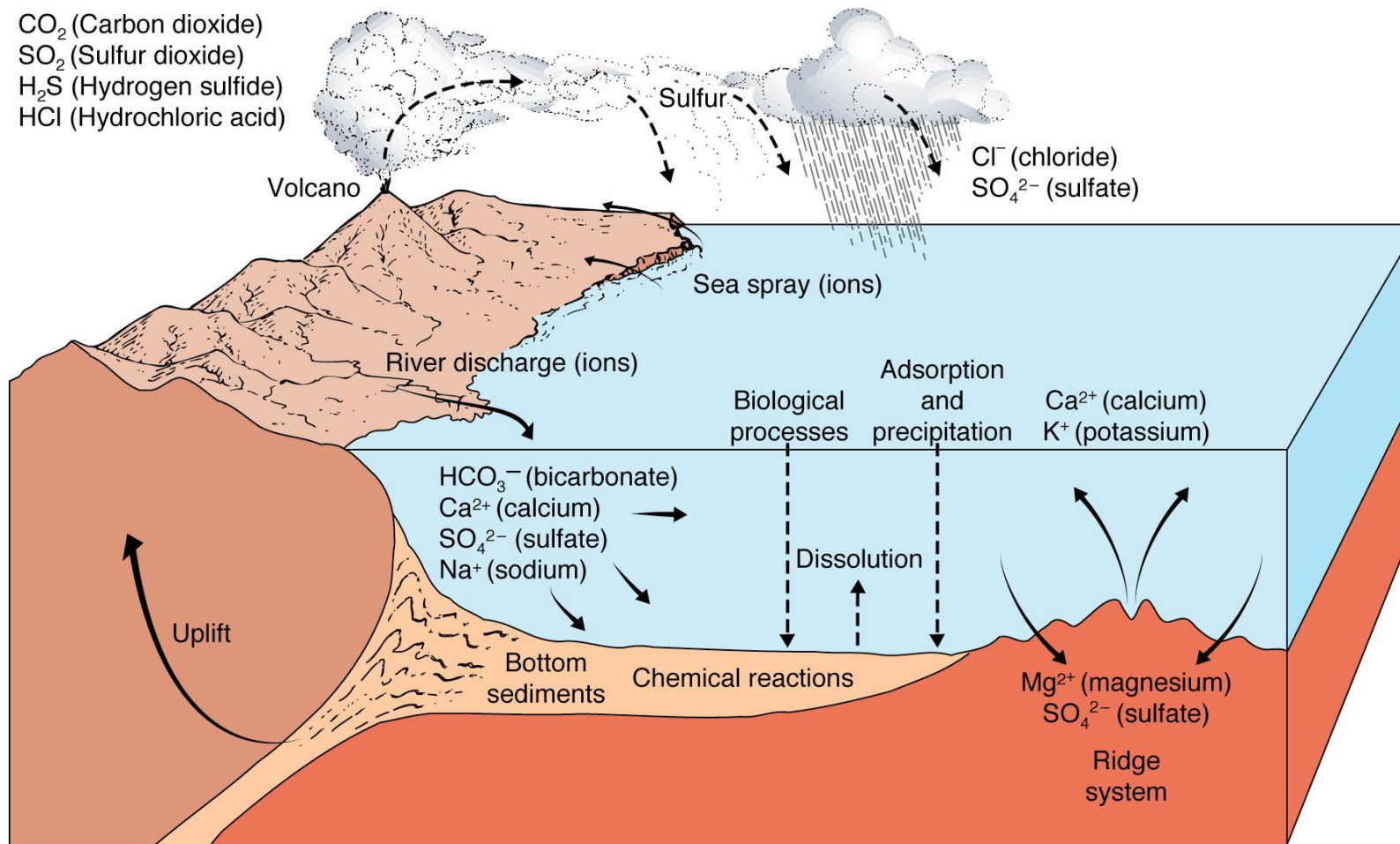


Figure 1.2

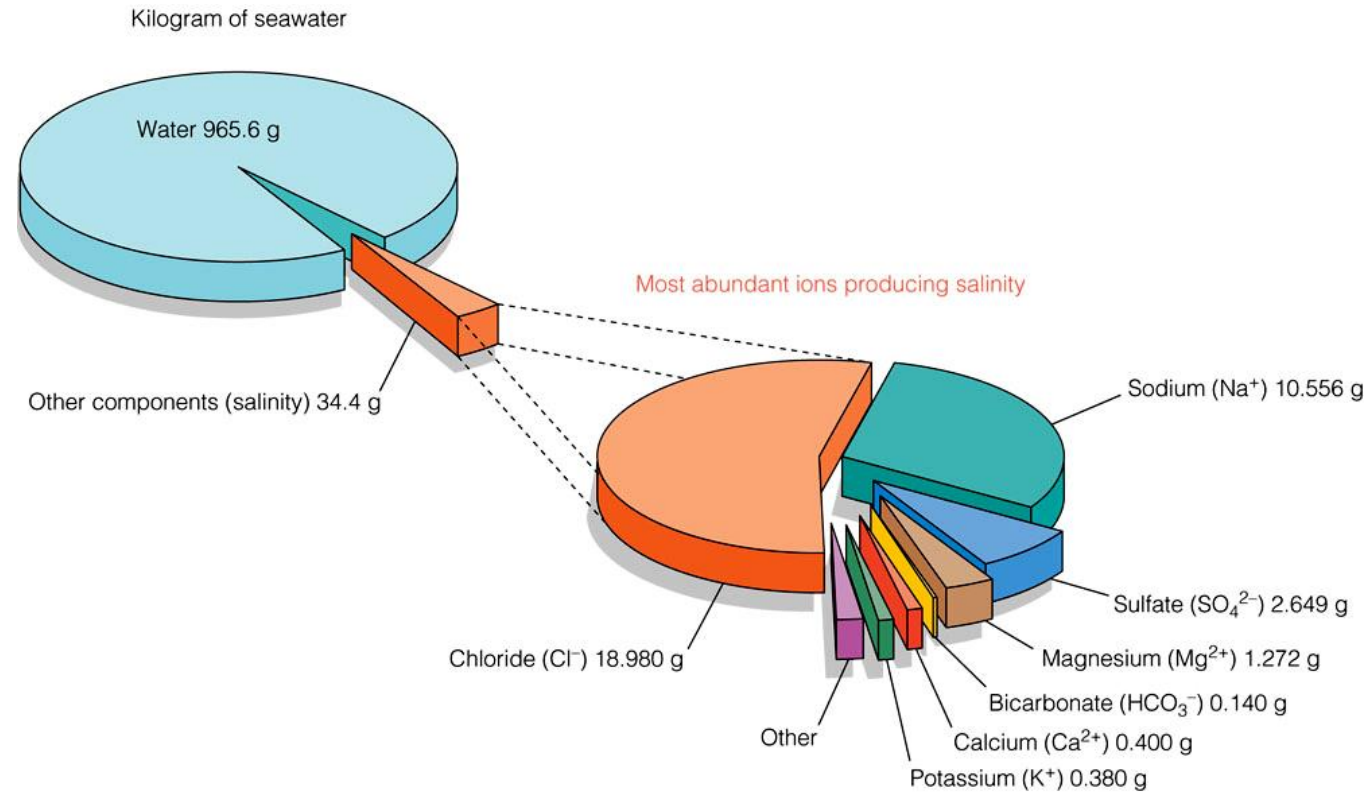
Calcium oxide released during chemical weathering of silicate rocks mates with carbon dioxide escaping from the Earth's interior to form calcium carbonate. As there is no other important sink for calcium, the supply of CaO must be matched by that of CO₂. A feedback involving the atmosphere's CO₂ content assures that this match is maintained.

Kopplung Land-Ocean



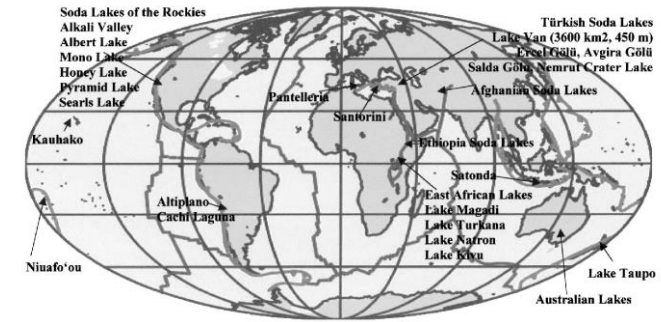
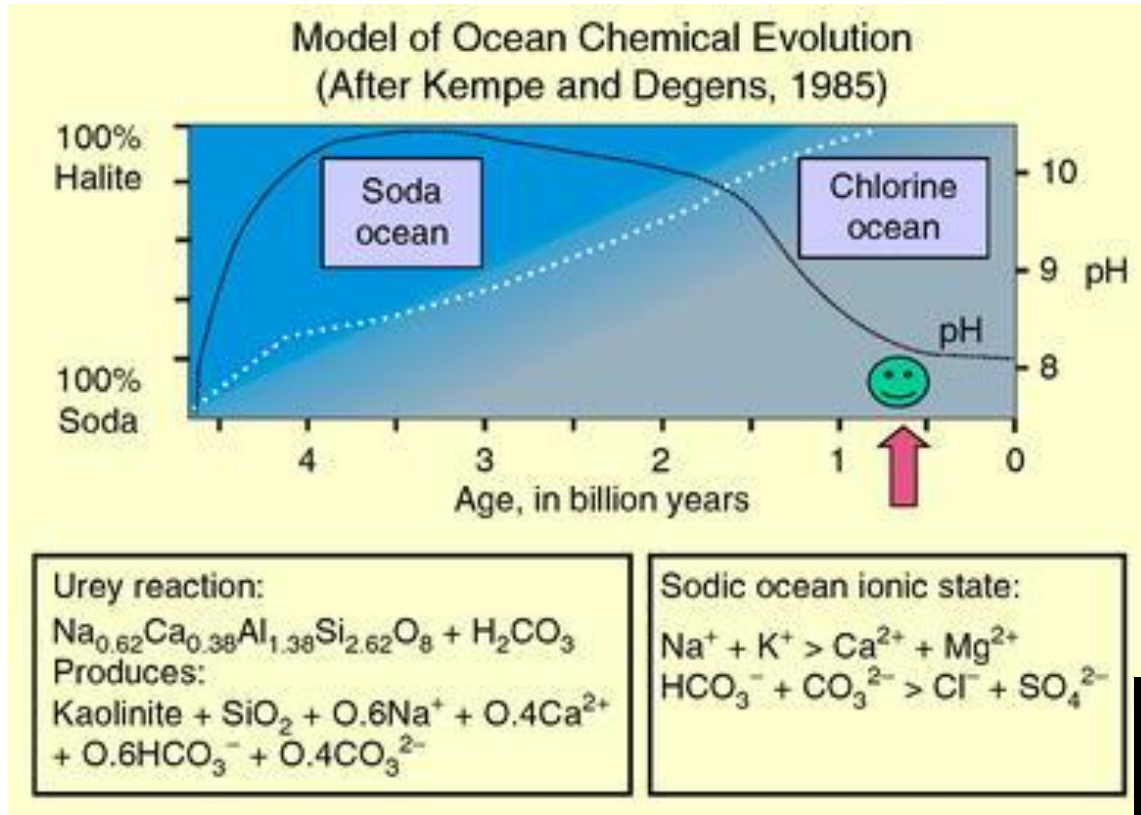
Eigenschaften von modernem Meerwasser

Meerwasser besteht zu 96.5% aus Wasser und 3.5% aus gelösten Stoffen und Gasen



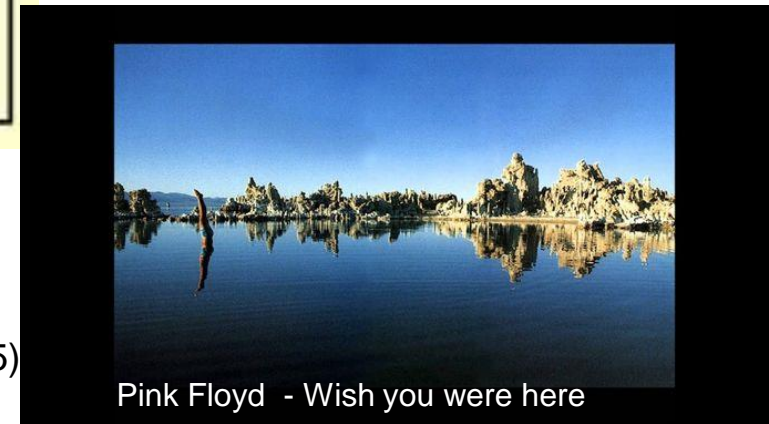
Ein Blick zurück? Wann begann die Ozeanversauerung?

KEMPE AND KAZMIERCZAK (2002, 2009)



- Die ‚Soda-Ozean-Hypothese‘ -

Steve Hoffmann (1975)
Mono Lake, California



Pink Floyd - Wish you were here

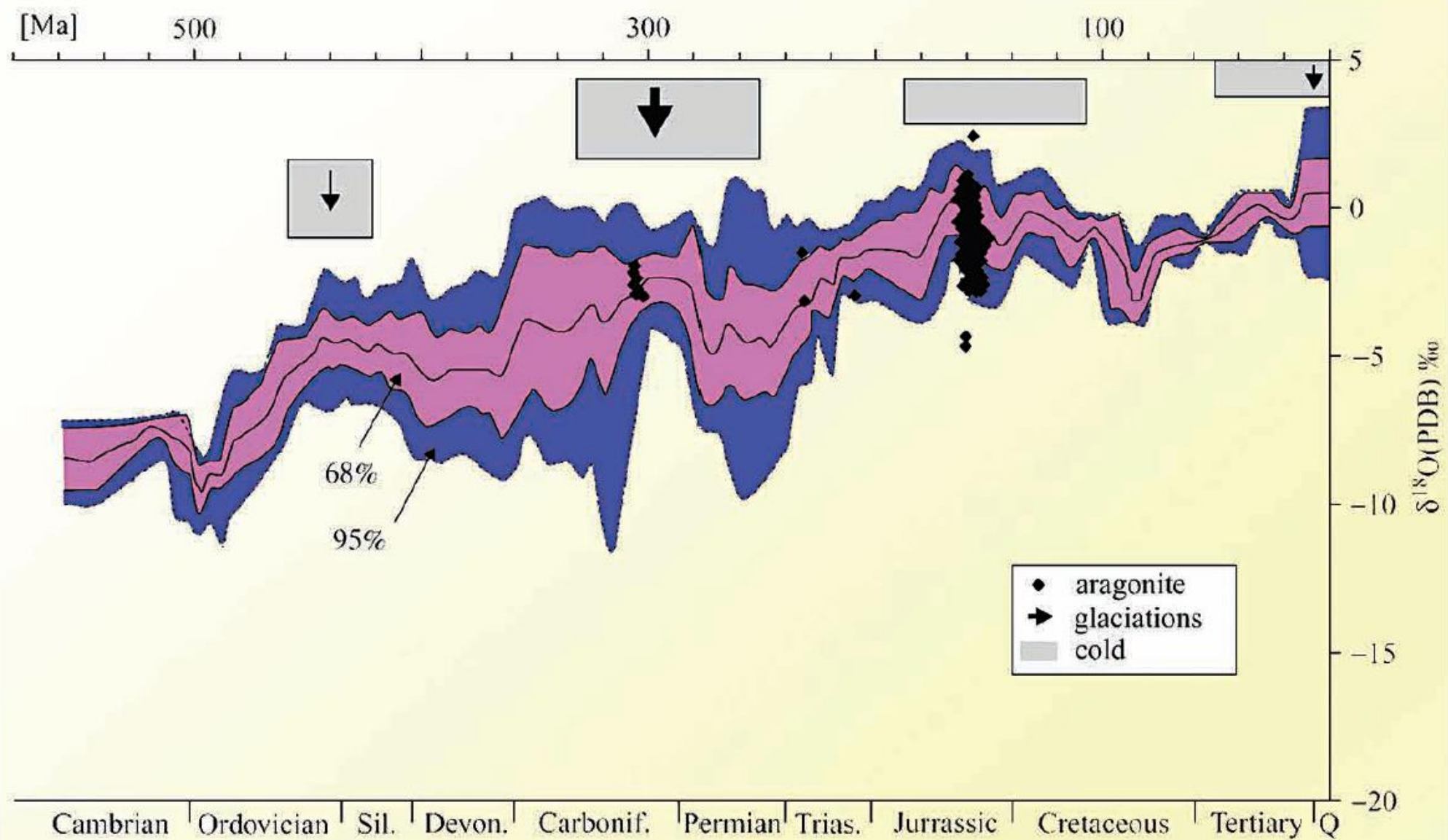
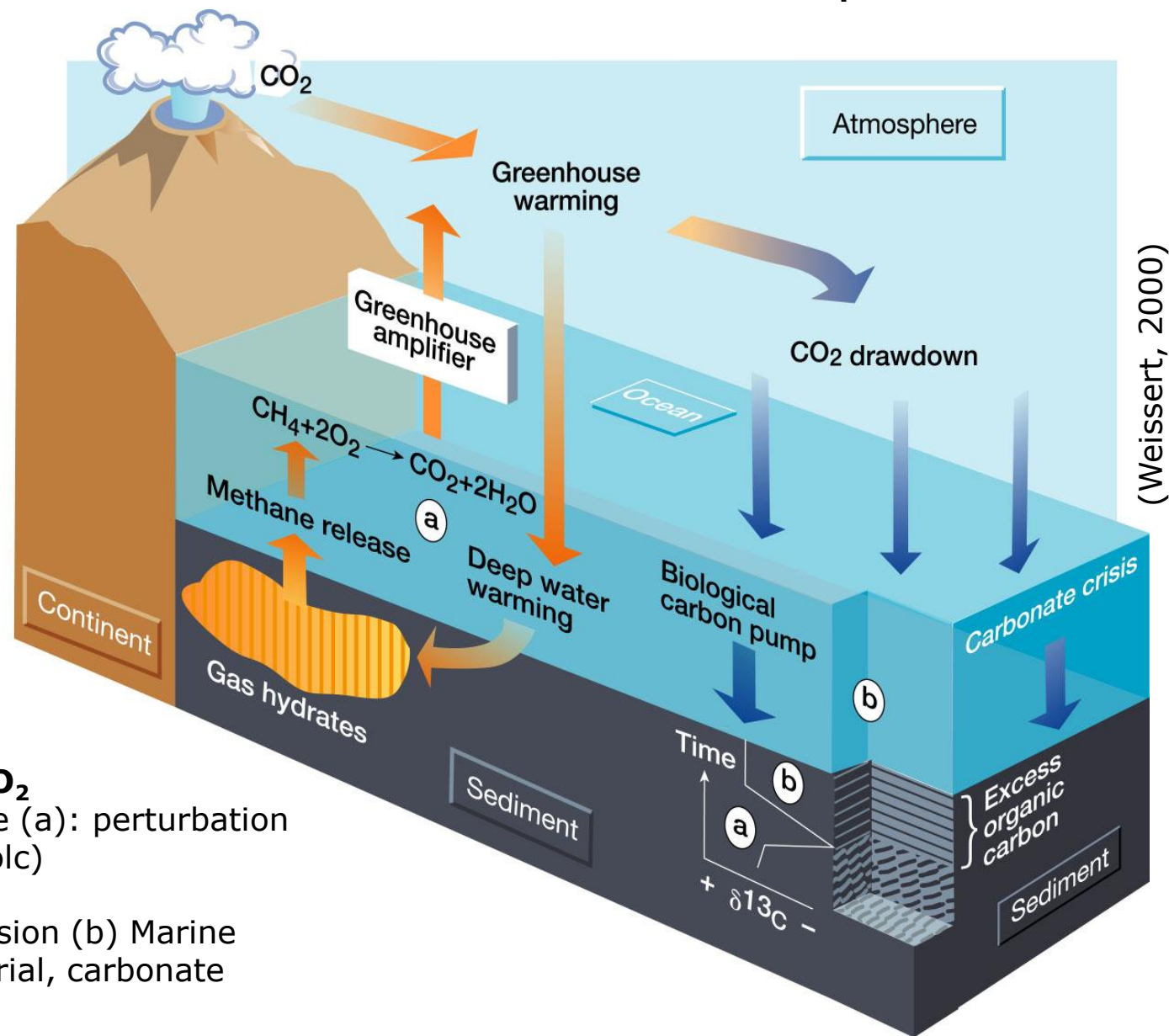


Figure 4.7

Phanerozoic variation in the oxygen isotope composition of marine carbonates based on 4,500 samples of calcite and aragonite shells. Periods of inferred cold climate and glaciations are also shown (after Veizer *et al.*, 1999).

Der globale C-Kreislauf: Störungen und Antworten durch die Biosphäre



Methane-pulse and CO_2

Negative C-isotope spike (a): perturbation signal (methane, CO_2 volc)

Positive C-isotope excursion (b) Marine response signal (C_{org} burial, carbonate crisis)

Ein Blick nach vorn?

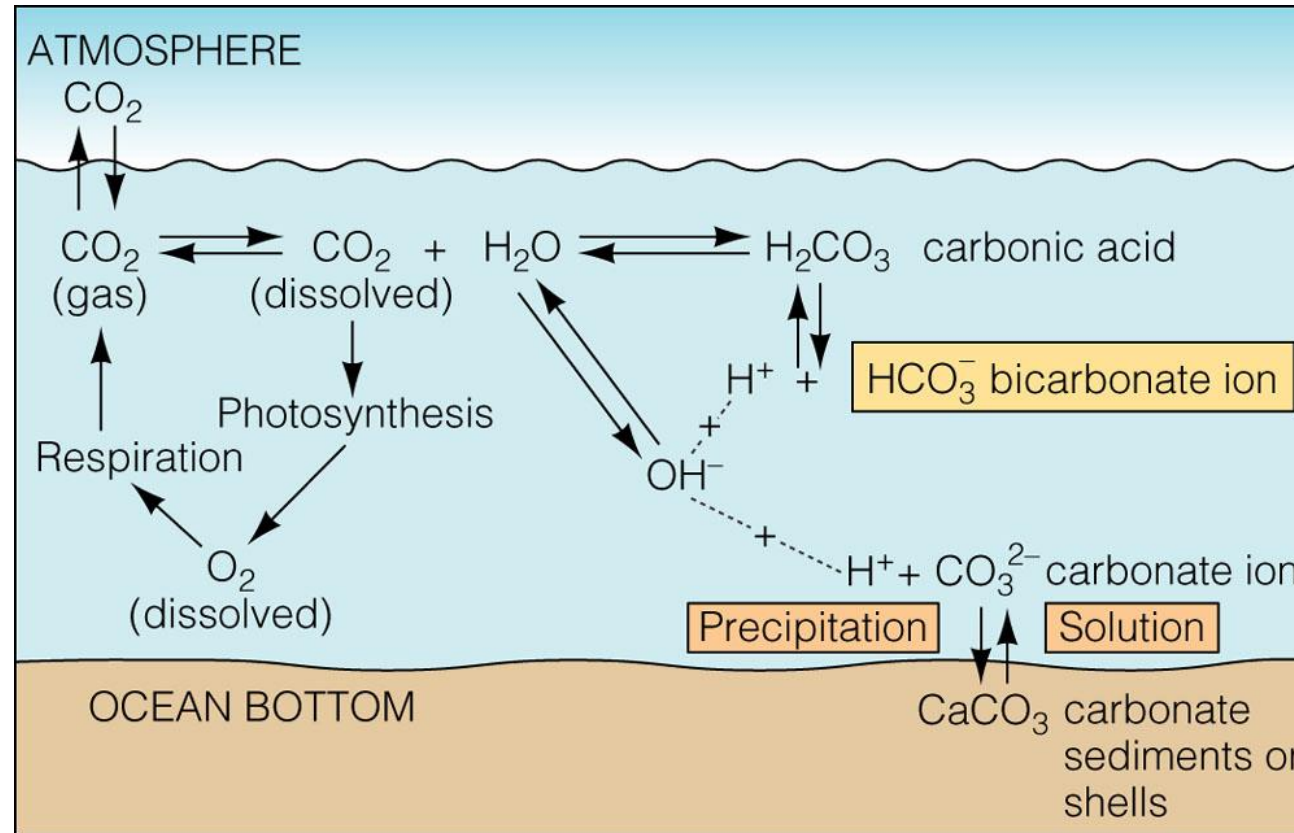


Der Spiegel (2006)

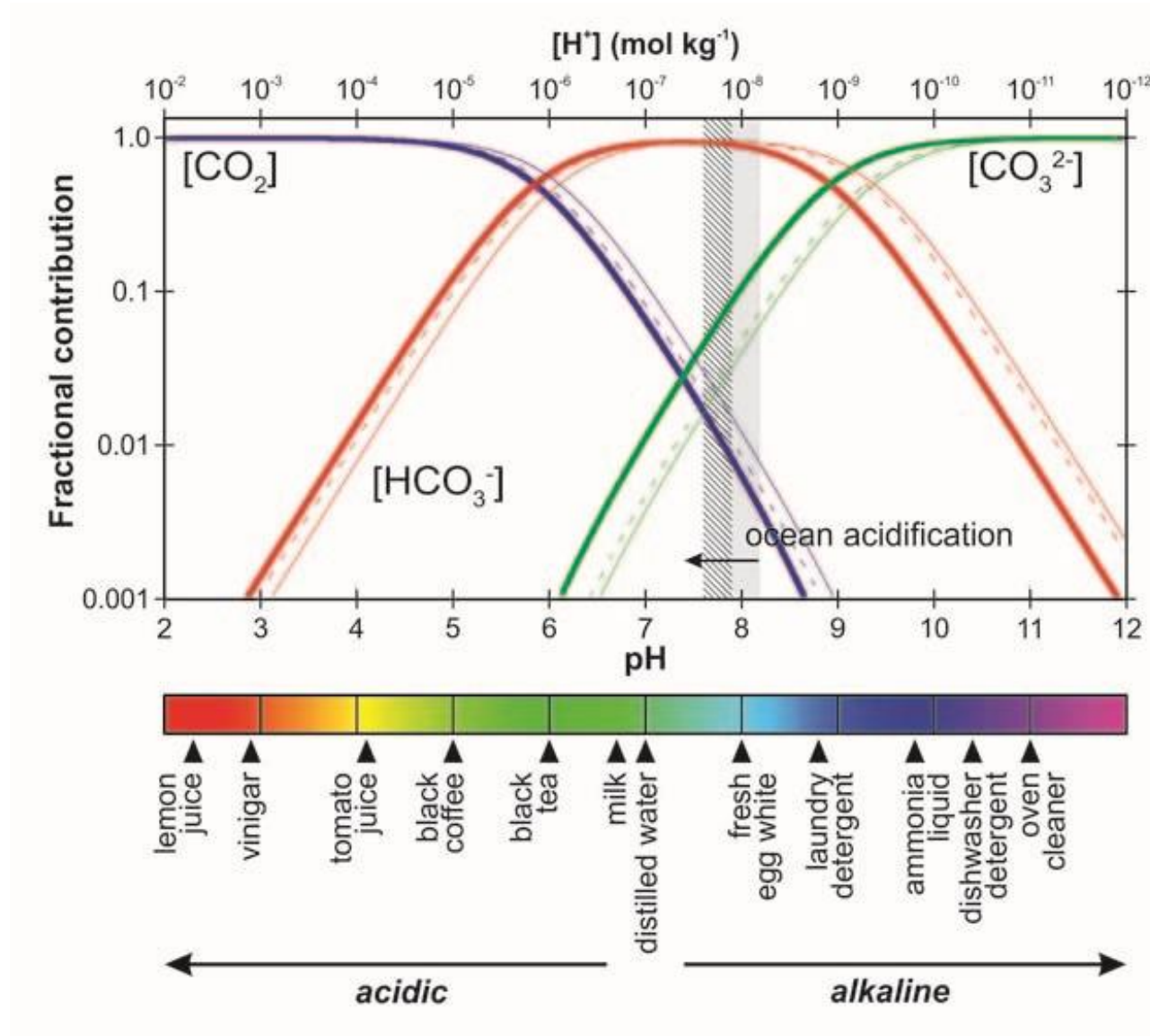
Heute:

Als ‚Ozeanversauerung‘ verstehen wir die Absenkung des pH Wertes vom Oberflächenwasser des Meeres infolge der Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (‚das andere Kohlendioxid-Problem‘)

Der marine Kohlenstoffkreislauf



pH-abhängige Speziation im Bjerrum Diagramm

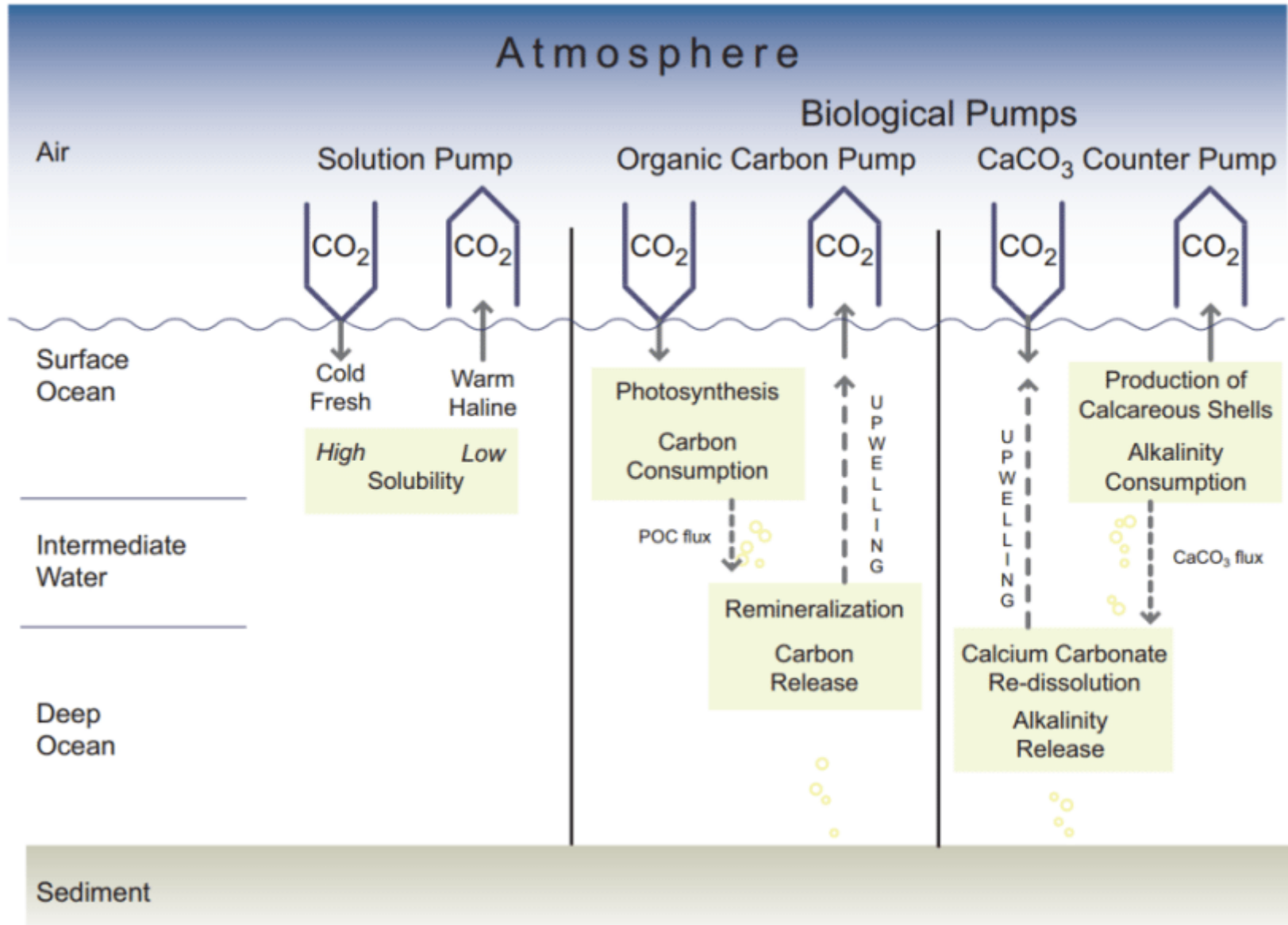


Bjerrum-Diagramm

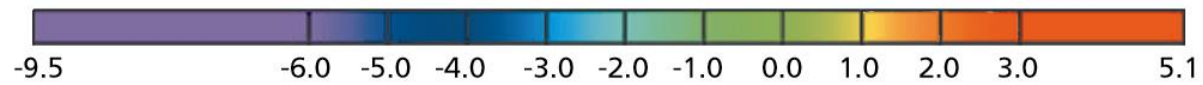
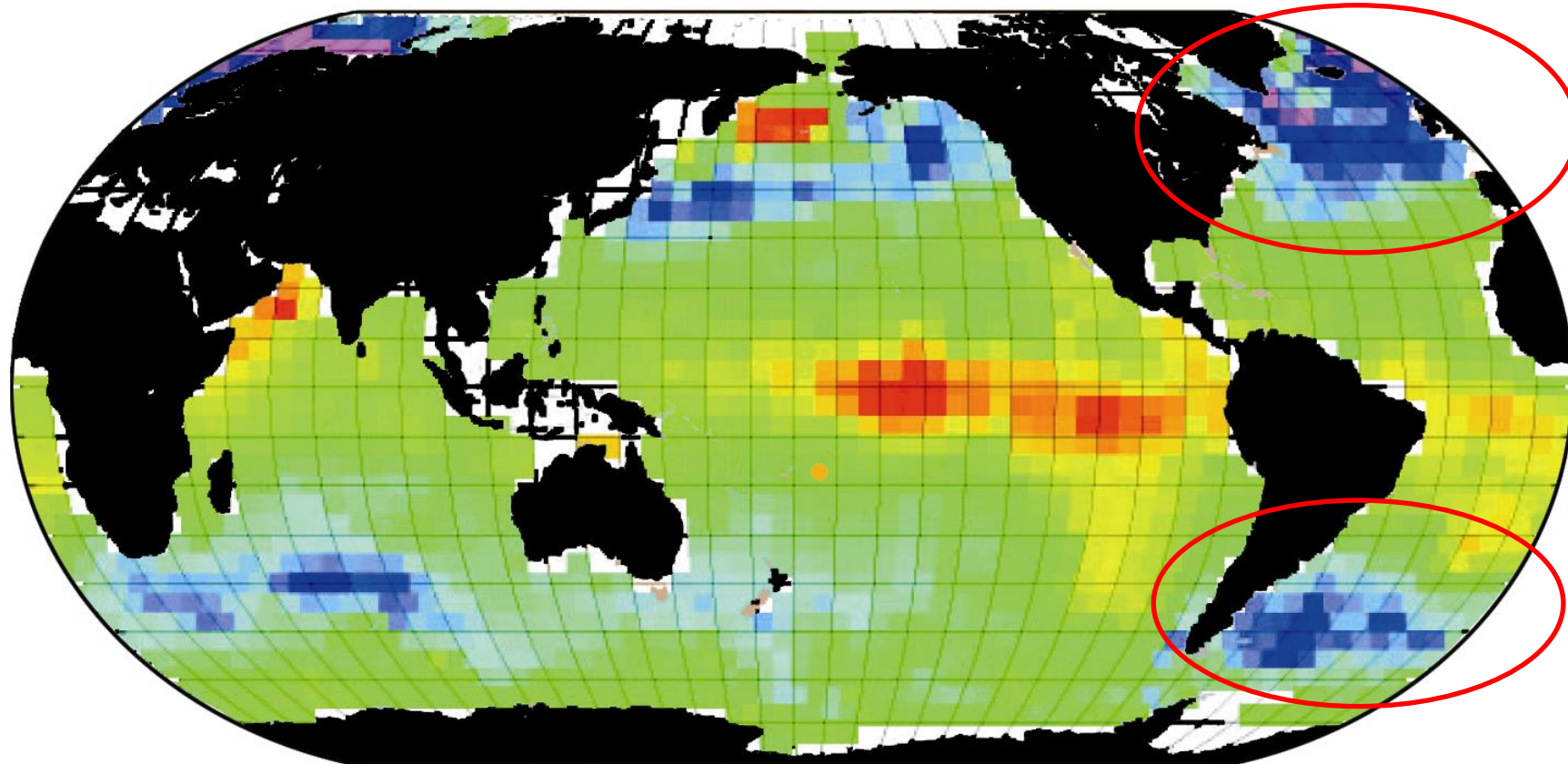
Kontrollierende Prozesse für das marine Carbonat System

- Photosynthese und Remineralisierung
- Kohlendioxid Lösung und Entgasung
- Biomineralization und Auflösung von CaCO_3
- Denitrifizierung
- Küstennah: Mischung mit (Süss-)Wässern

Regulierende Prozesse für Änderungen im atmosphärischen CO₂ durch physikalische und biologische Pumpen



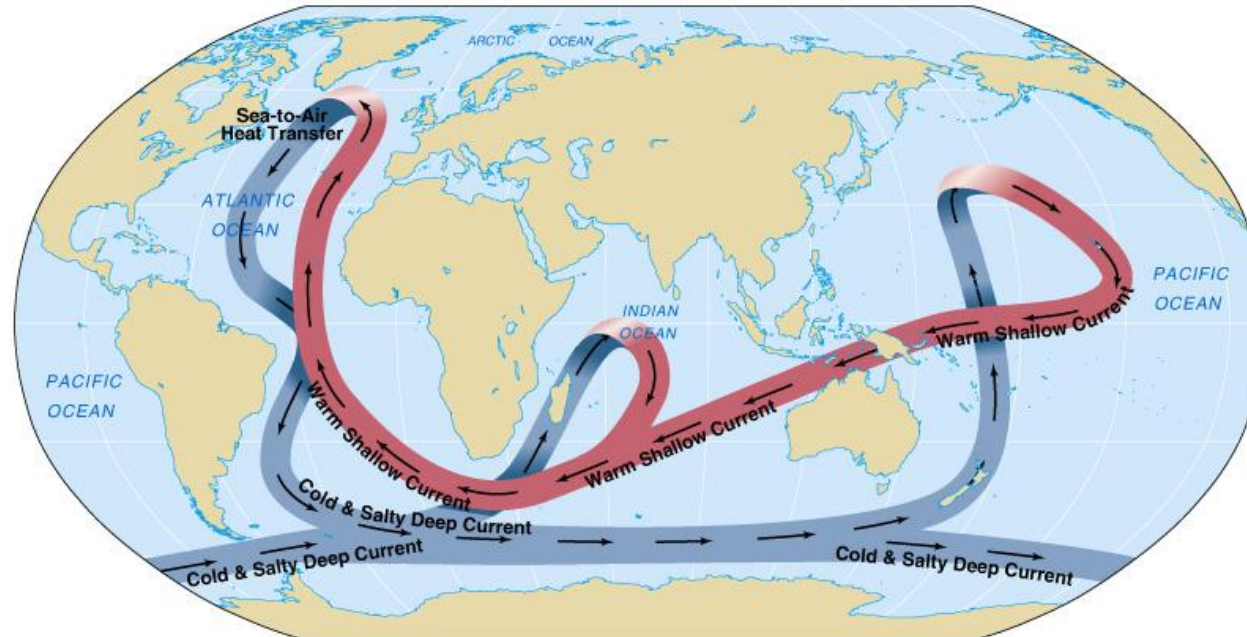
Austausch Ozean-Atmosphäre



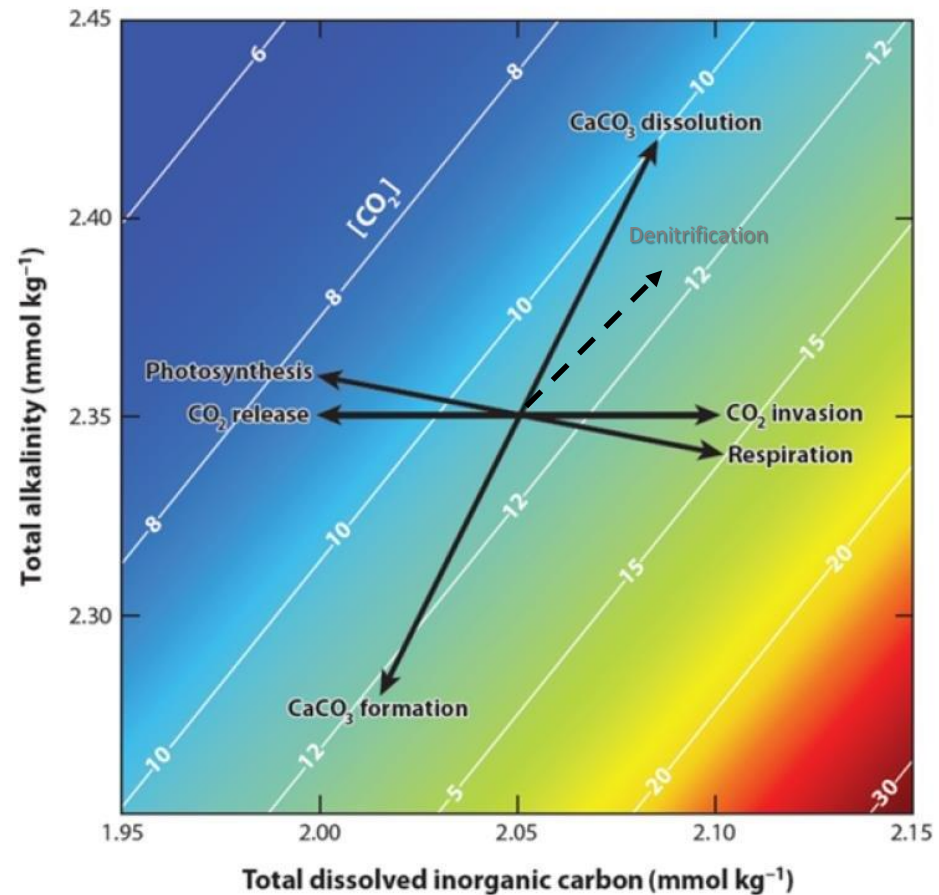
CO₂ Flux (moles carbon dioxide per square meter per year)

U.S. JGOFS

Das heutige Salz- und Wärme-Transportband („Conveyor belt“)



Brooks/Cole-Thomsen (2005)



After: Zeebe & Wolf-Gladrow (2001)

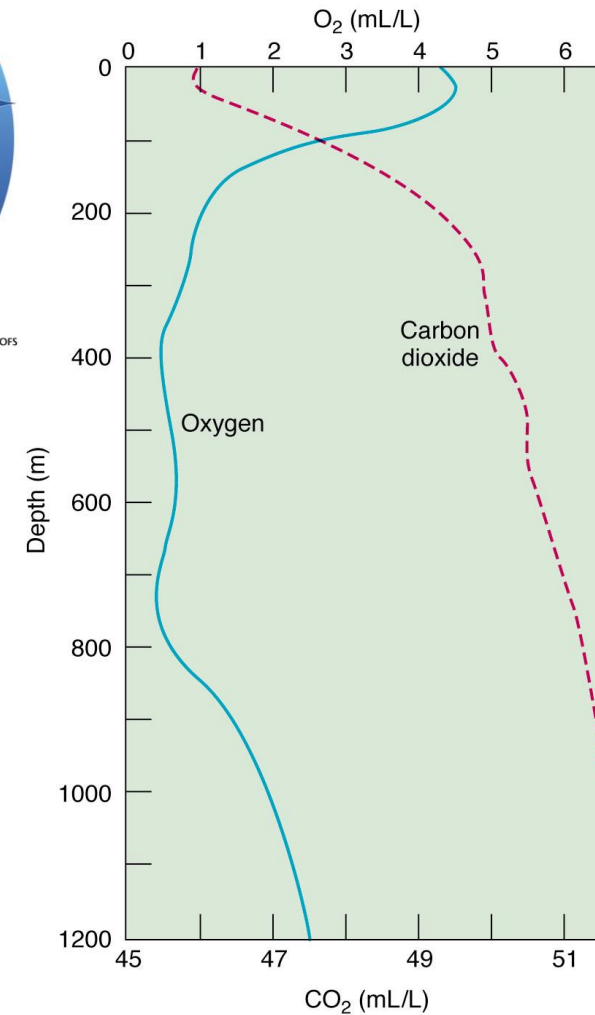
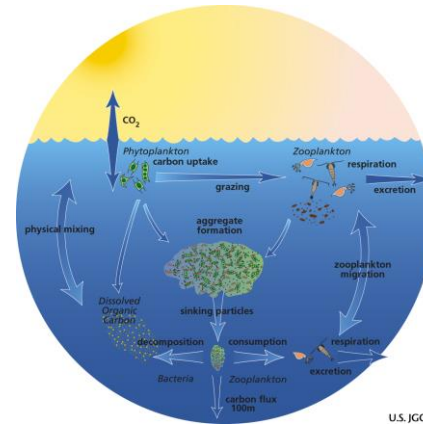
Ein Anstieg von anthropogenem CO_2 führt zu einem Anstieg von DIC, aber verändert nicht die Alkalinität

Bei der Bildung von CaCO_3 nimmt beides ab:
 DIC und TA. Pro Mol CaCO_3 , werden 1 Mol CO_3^{2-} und 1 Mol Ca^{2+} verbraucht, was zu einer Abnahme in DIC und TA im Verhältnis 1:2 führt.

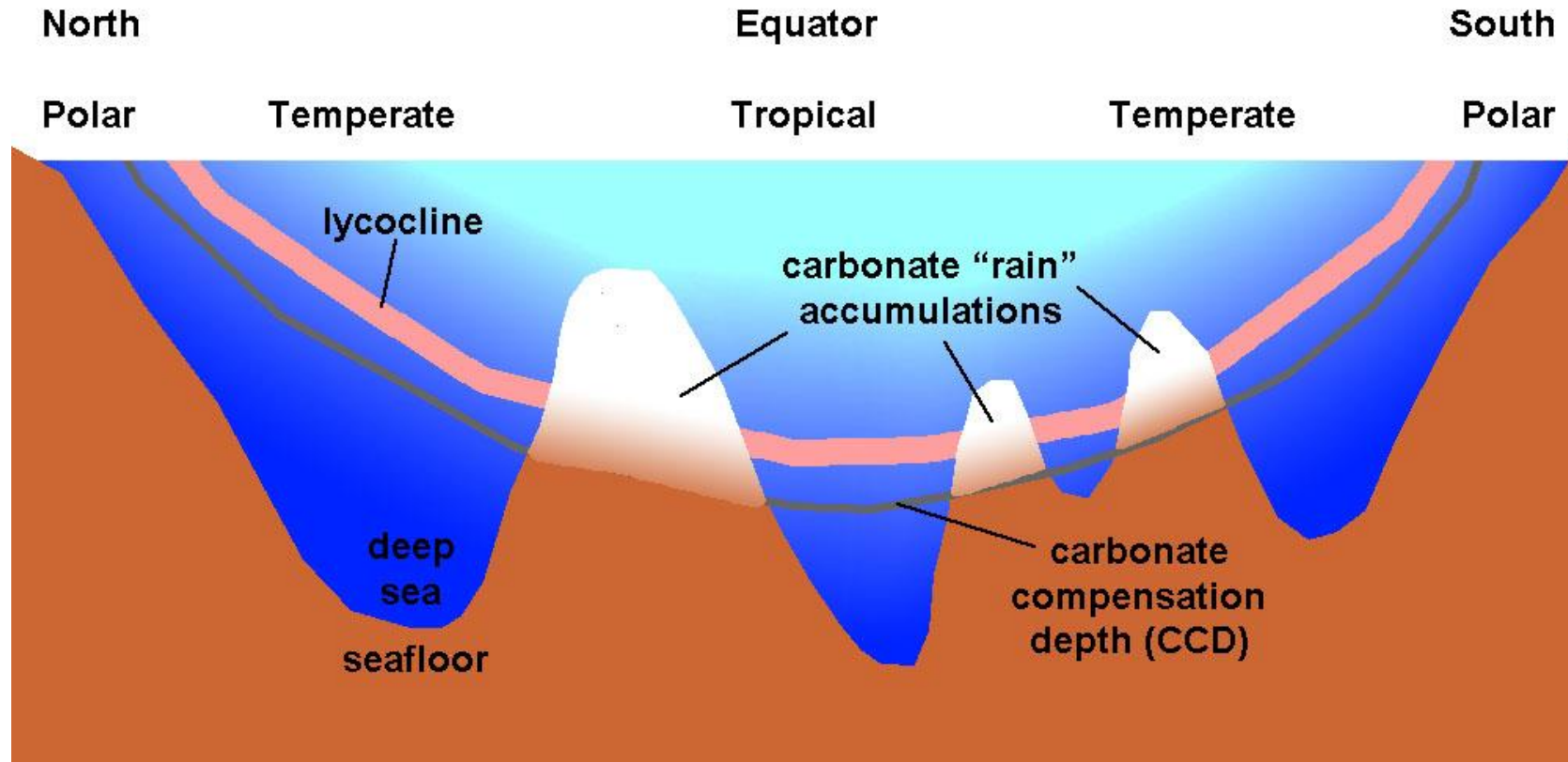
Kohlendioxid und Sauerstoff

- Photosynthese:
 - $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$
 - reduziert CO_2 und erhöht O_2 im Oberflächenwasser.

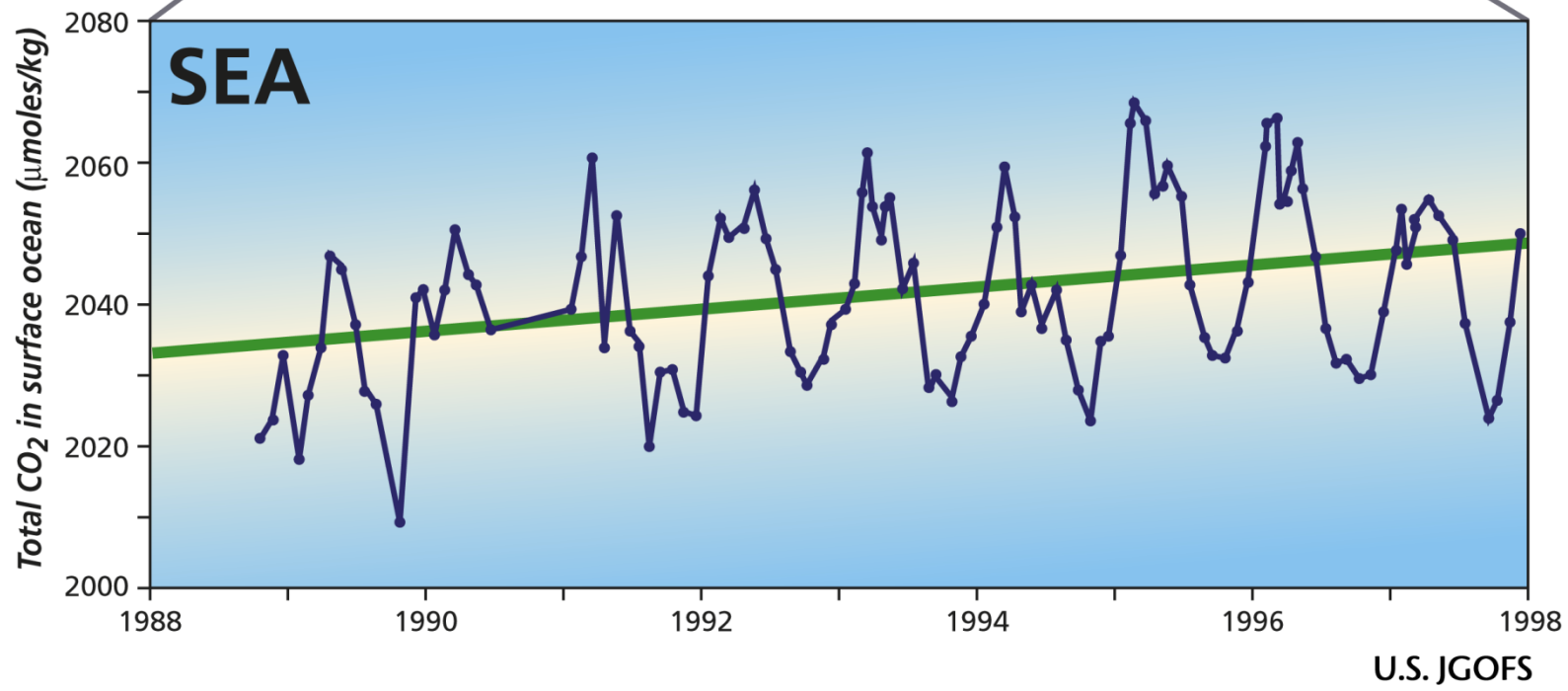
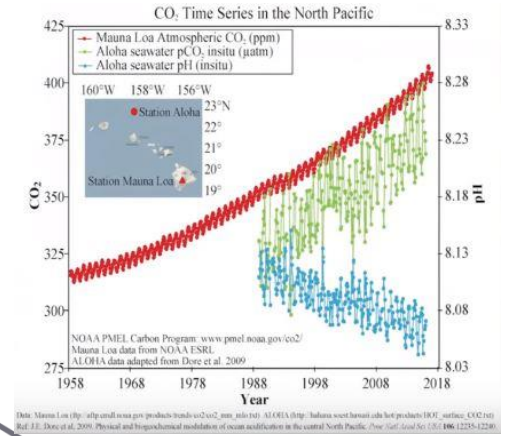
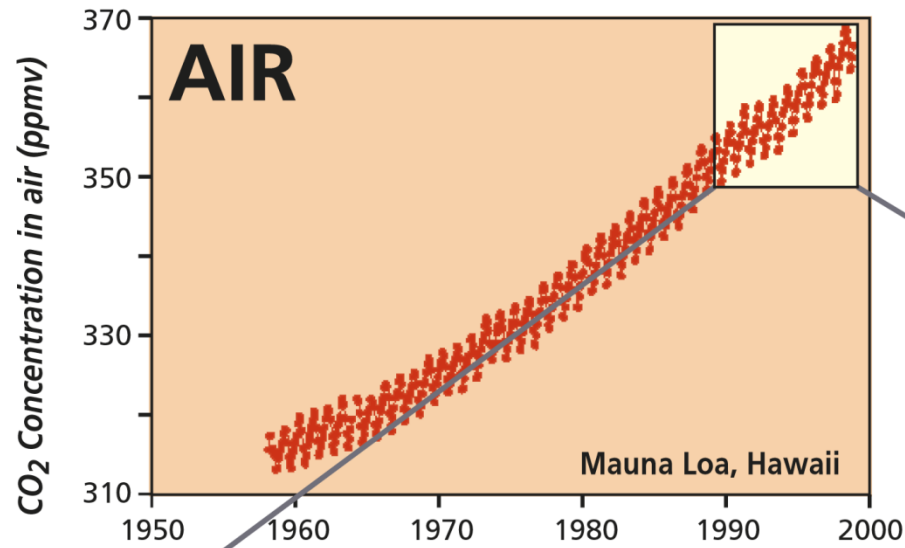
- Respiration:
 - $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - Erhöht gelöstes CO_2 und reduziert O_2 im tiefen Wasser.
 - Als Konsequenz wird CaCO_3 in tiefem kaltem Wasser gelöst

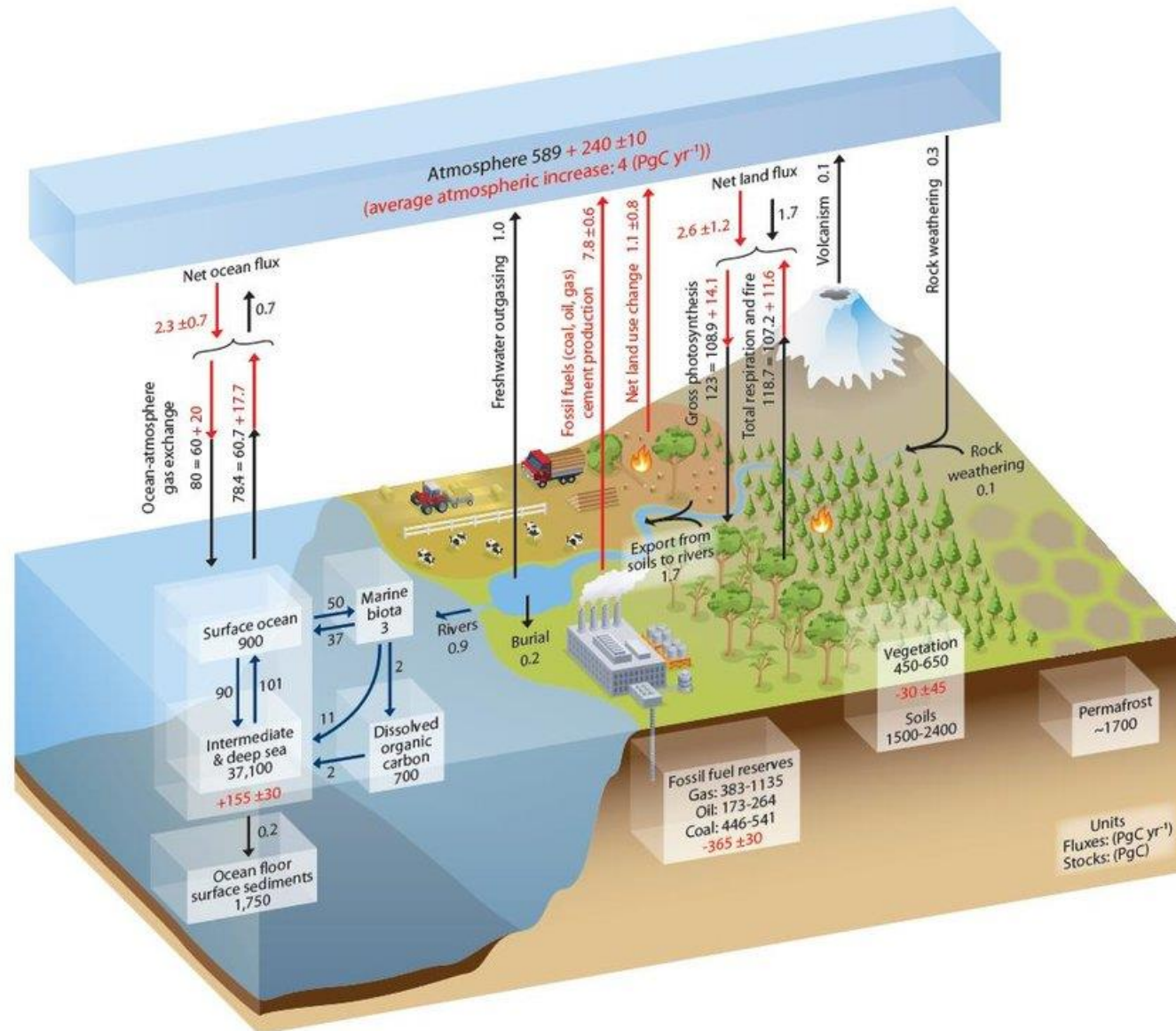


Carbonat-Kompensationstiefe und Lysokline

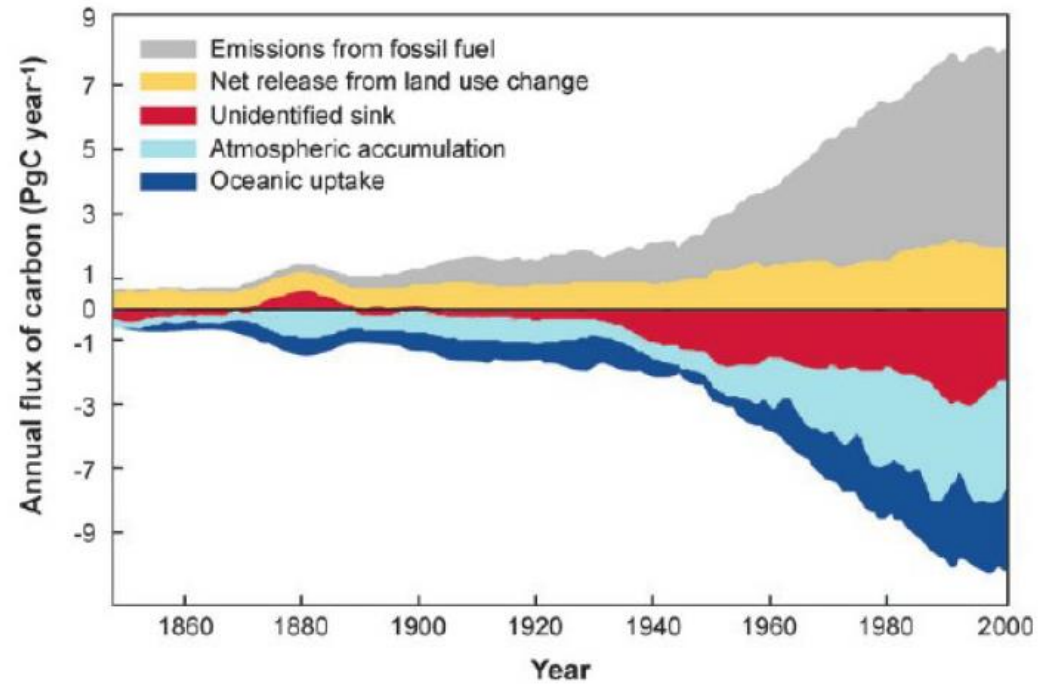
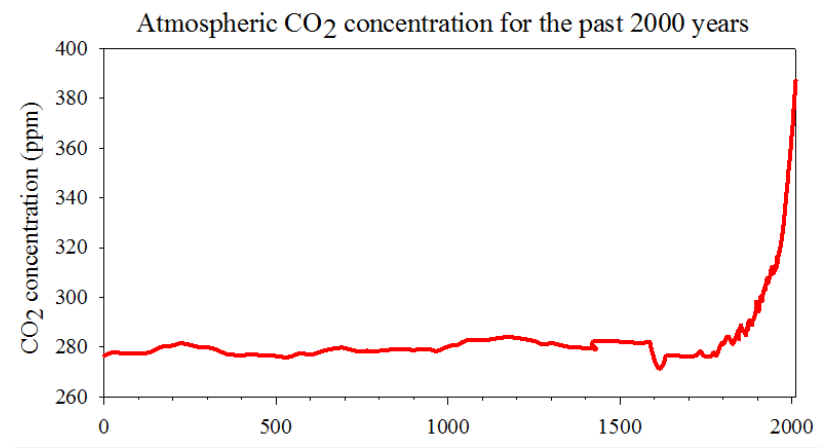


Miracosta (2021)





(IPCC 2013; Marrec, 2014)

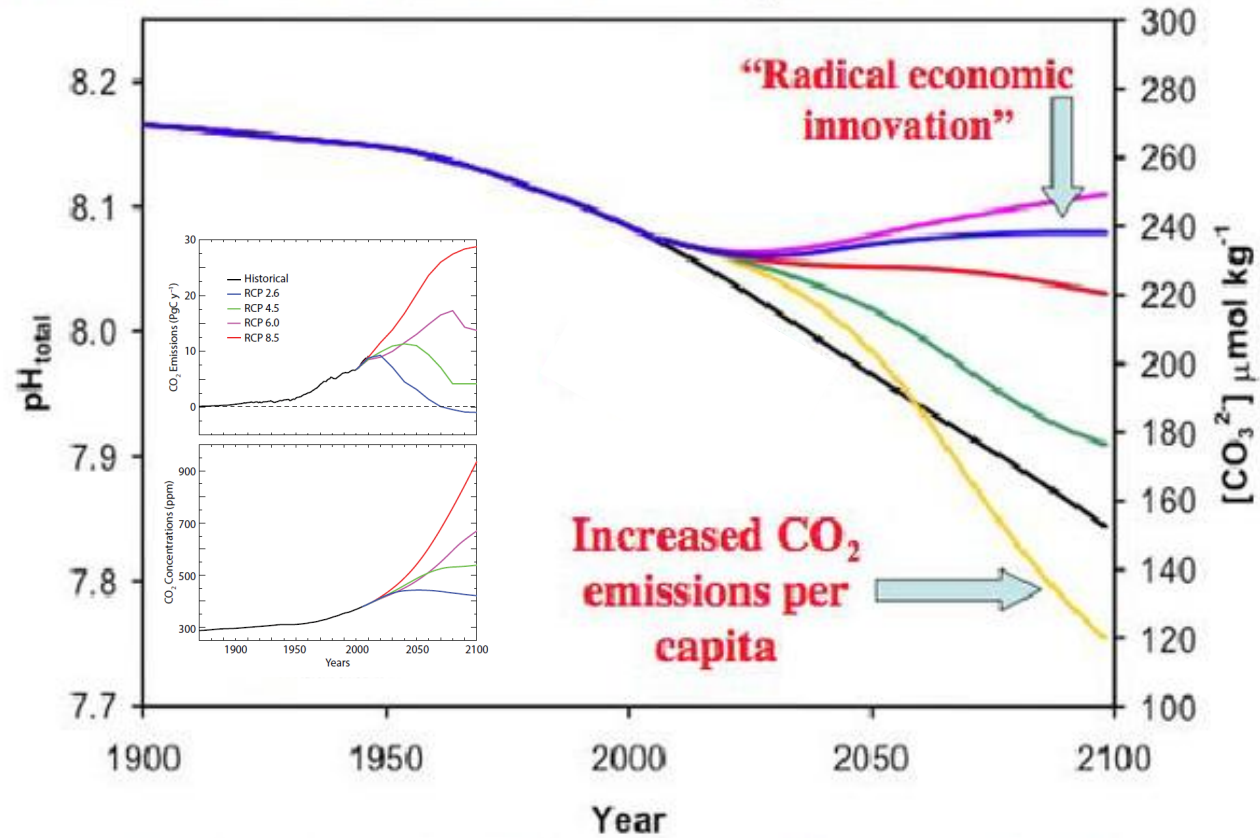


Globale Senken und Quellen für CO₂

Marrec 2014

Houghton 2007

Szenarien für die Entwicklung von CO_2 , pH und CO_3^{2-}

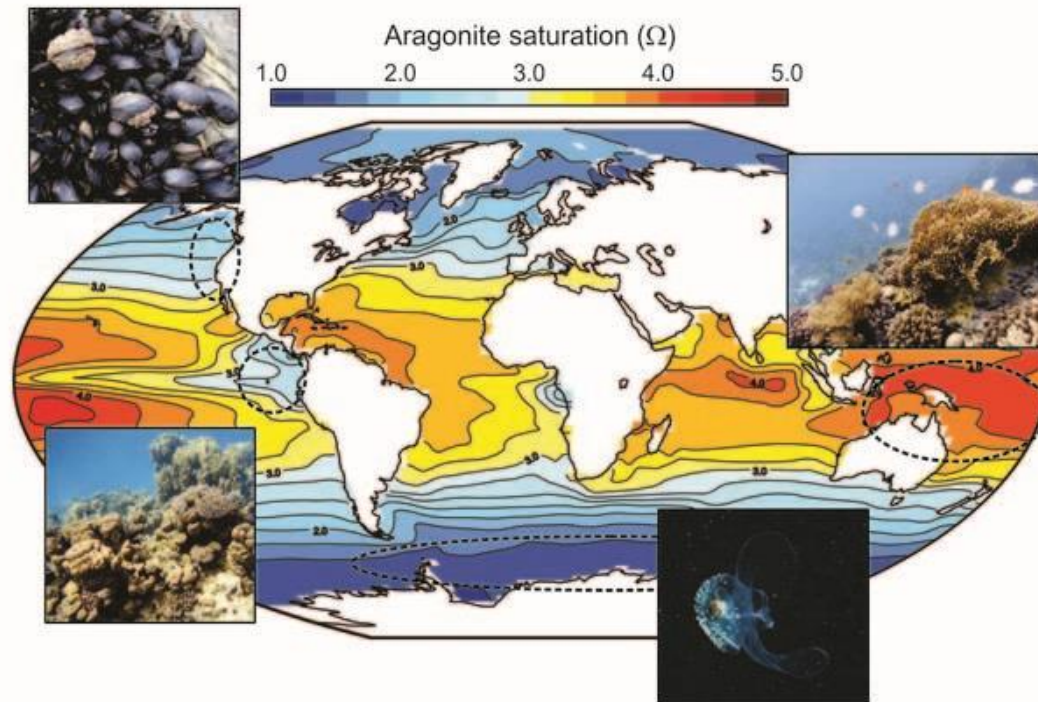


Bottom Line: Need to reduce emissions of CO_2 !!

Grossman, Mackenzie and Andersson, 2007
Marrec, 2014

Einfluss auf Biologie: Sättigung des Meerwassers bezüglich biogener Carbonate

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{seawater}} [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{seawater}}}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{saturation}} [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{saturation}}} \quad \text{„Sättigungsgrad, SG“ (log}_{10} \text{ SG} = \text{SI})$$



SG = 1: Gleichgewicht
SG < 1: Untersättigung
SG > 1: Übersättigung

Beispiel: Benthische Gemeinschaften unter T und pH Stress



Fucus vesiculosus (Blasentang)



Spirorbis spirorbis

(Malcolm Storey, bioimages.org.uk)



Benthoscosmen-Experiment:

Saisonale Variationen
+
Manipulationen:

Control

+T

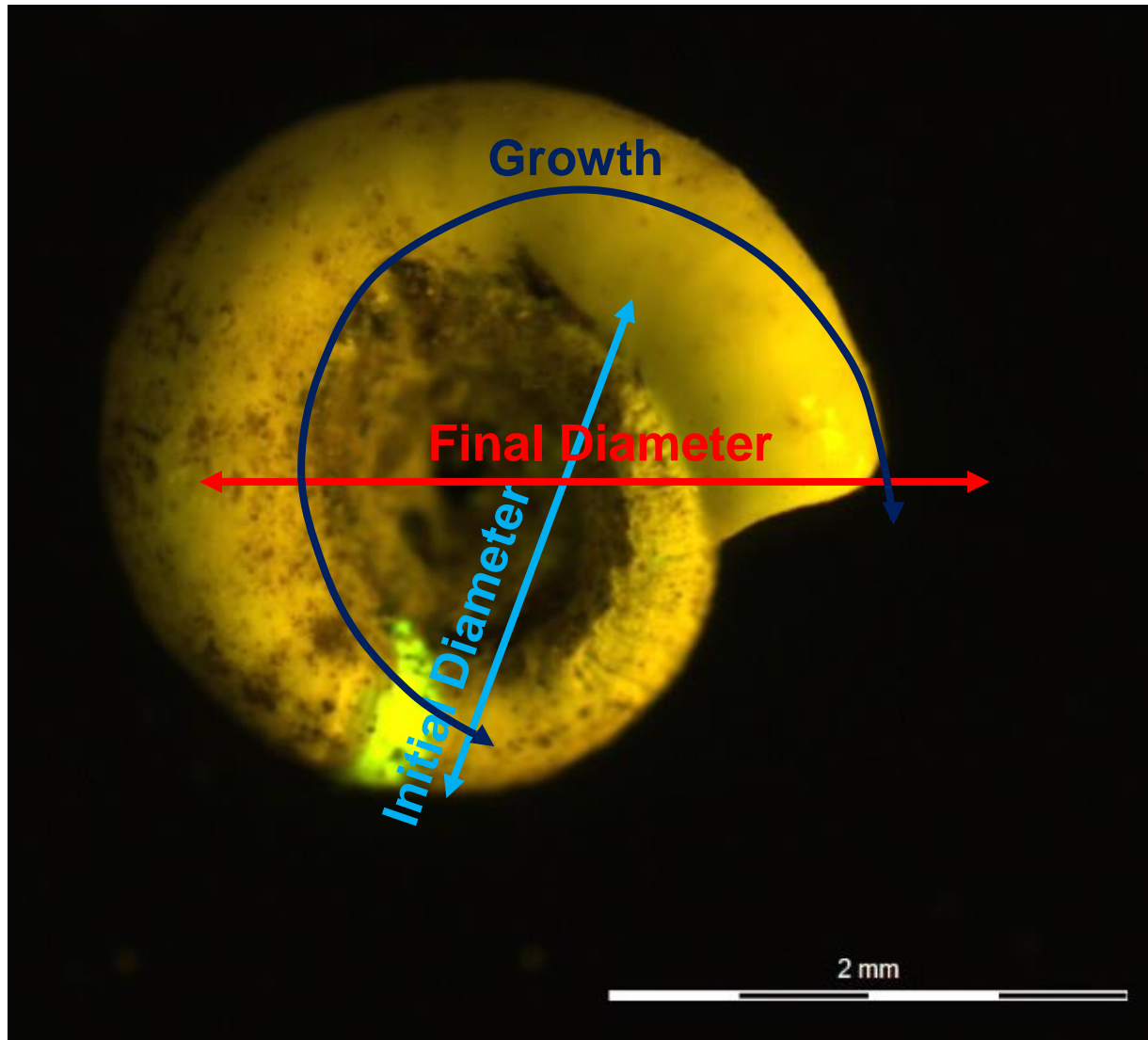
+CO₂

+CO₂+T

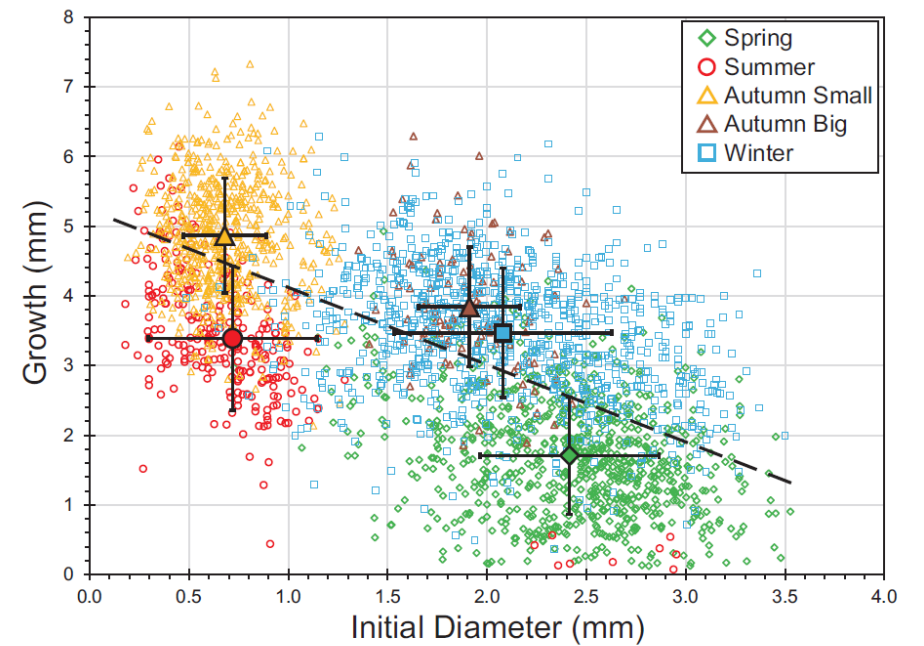


Ni (2016)

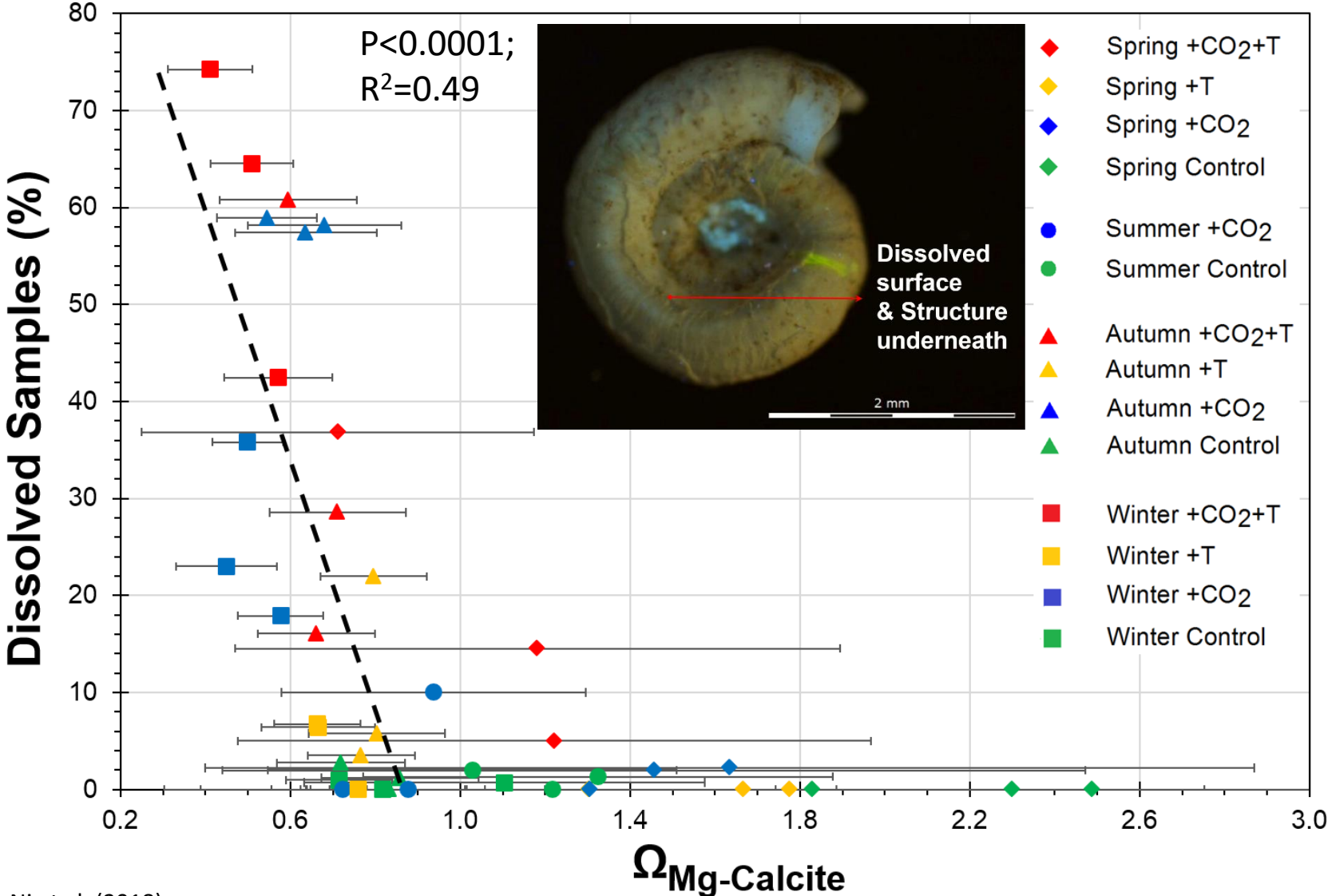
mesocosm webcams, Geomar



Growth rate parameters

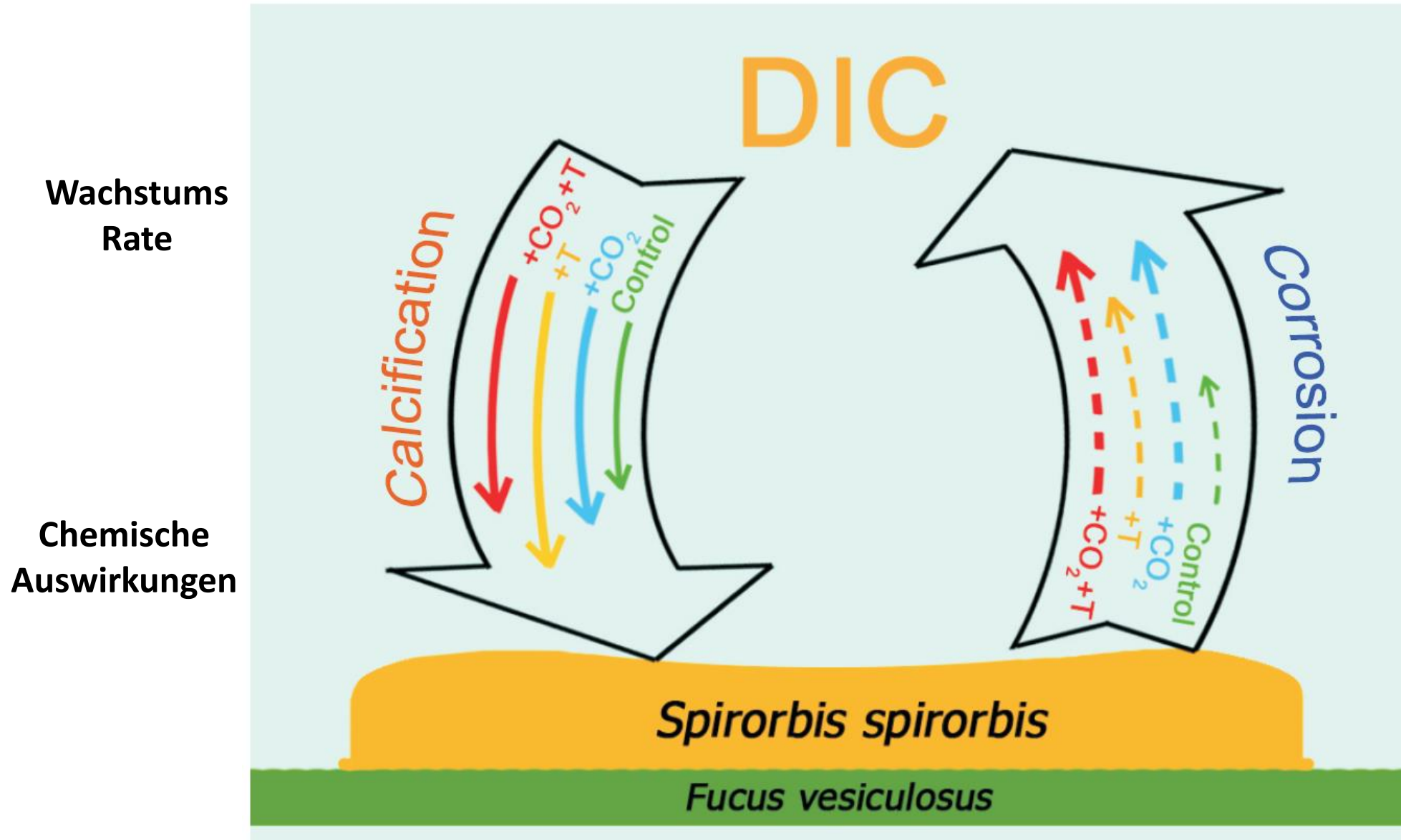


Oberflächen-Anlösung trotz Wachstum



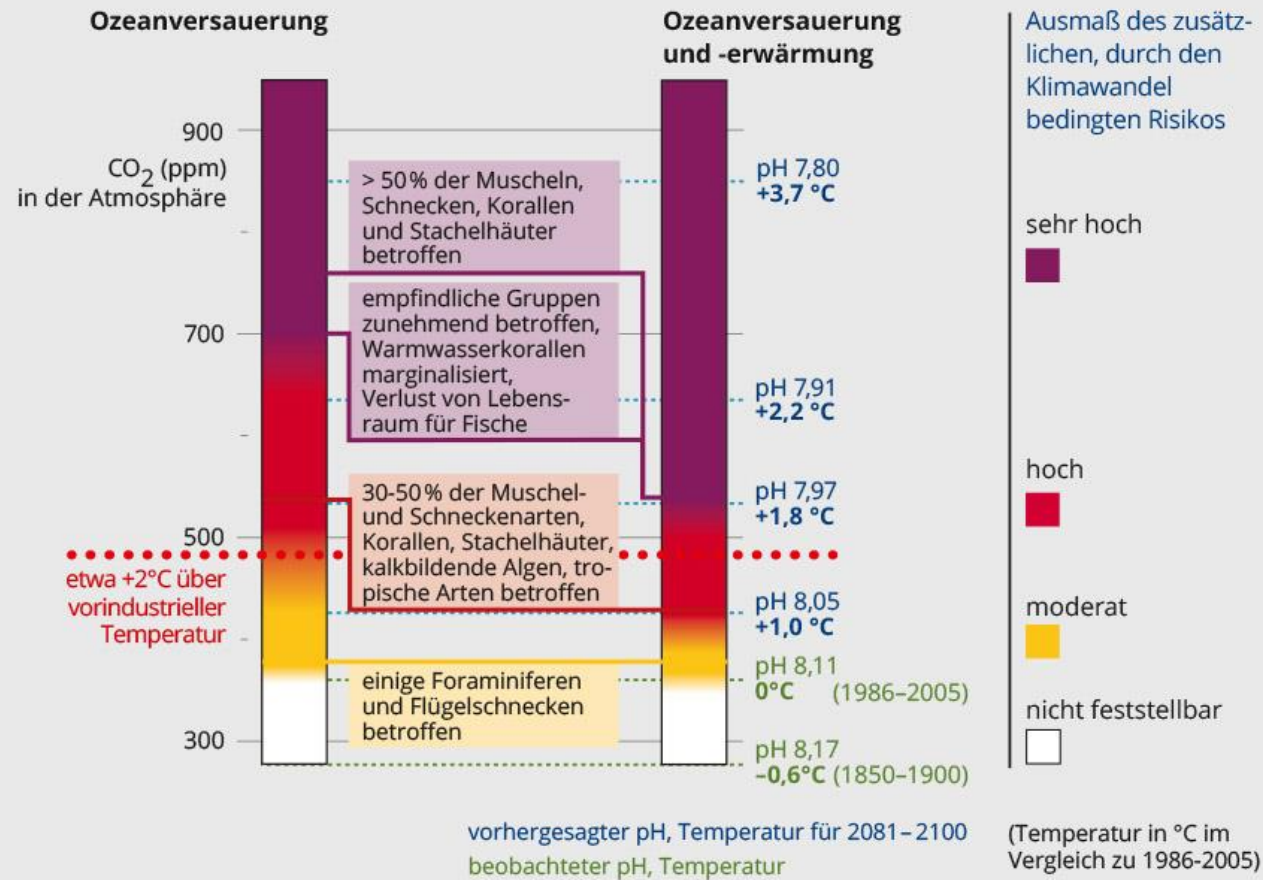
Ni et al. (2018)

Stressoren: Zusammenfassung



(,Dieses und das andere Kohlendioxid-Problem')

Risiko für Meeresorganismen, die von Ozeanversauerung allein oder in Kombination mit deutlicher Erwärmung betroffen sind



Quelle: IPCC Synthesebericht 2014; O'Neill et al., 2017; hier aktualisiert: Mintenbeck und Pörtner, in Vorbereitung.

BIOACID (2014)

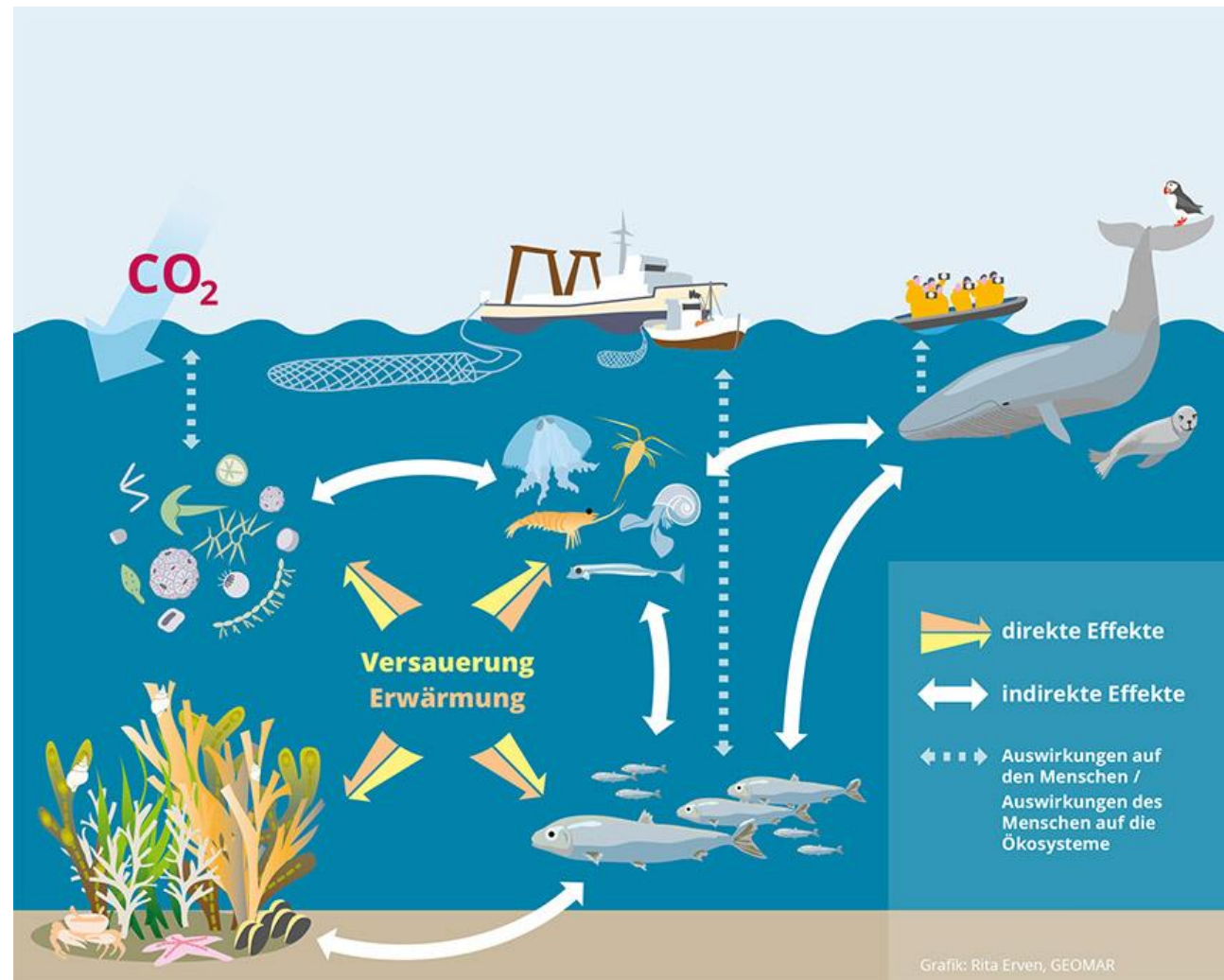


Abbildung: Ozeanversauerung und -erwärmung können Organismen direkt beeinflussen und sich in ihrer Wirkung gegenseitig verstärken oder abschwächen. Die Reaktionen einzelner Mitglieder des Nahrungsnetzes wirken sich indirekt wieder auf andere Organismen und ganze Lebensgemeinschaften aus. Aus dem Wechselspiel der Effekte ergeben sich letztlich auch Konsequenzen für wichtige Ökosystem-Leistungen wie die Aufnahme und Speicherung von Kohlendioxid, die Nahrungsversorgung durch Fischerei oder den kulturellen und den Erholungswert der Ozeane (BIOACID, Geomar).

Einige Fakten zur Ozeanversauerung (nach BIOACID 2014)

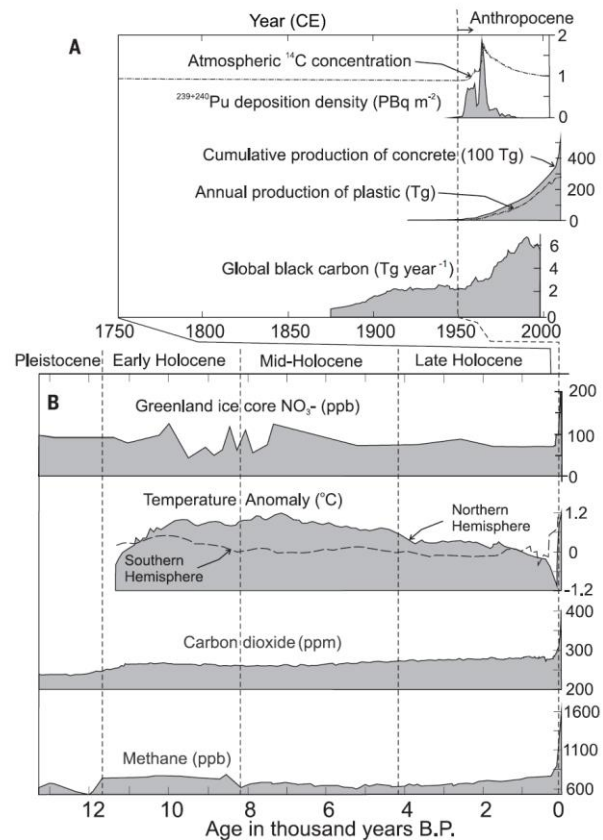
- Ozeanversauerung ist eine fortschreitende Verringerung des pH-Werts
- Der durchschnittliche pH-Wert Oberflächenwässer des Meeres ist gesunken
- Wirklich „sauer“ wird das Meereswasser vermutlich nie werden
- Durch die Ozeanversauerung wird auch die Kohlenstoff- Chemie des Meerwassers verändert
- Die biologischen Folgen der Ozeanversauerung variieren
- Viele kalkbildende Organismen im Ozean reagieren sehr empfindlich auf Änderungen des pH-Werts und der Karbonat-Chemie.

- **Ozeanversauerung wird das Leben im Meer nicht komplett auslöschen.**
- **Zu den Regionen, die wahrscheinlich besonders empfindlich auf die Versauerung reagieren werden**, gehören Auftriebsgebiete, die Polarmeere, und Küstenregionen mit Süßwasserzufluss.
- **Ein langfristiges Absinken des pH-Werts könnte die Toleranzschwelle vieler Arten in Küstenregionen überschreiten**
- **Ozean-Versauerungsereignisse der Vergangenheit erlauben Abschätzung auf Ökosystemänderungen und deren Zeitachsen**
- **Die derzeitige beispiellose Versauerung verläuft laut Schätzungen zehn- bis 100-fach schneller als jemals zuvor in den vergangenen 50 Millionen Jahren**

- **Geoengineering-Ansätze, die den Planeten kühlen sollen, greifen nicht gegen die Ozeanversauerung**
- **„Blue carbon“ wird derzeit als Möglichkeit geprüft, CO₂-Werte lokal zu senken**
- **Eutrophierung kann lokal globale Effekte verstärken (Hypoxia, Stress)**
- **Ein verringerter Nährstoffeintrag könnte die Folgen der Versauerung verändern**
- **Ozeanversauerung stellt einen weiteren Stressfaktor für die marine Umwelt dar und könnte die Dienstleistungen gefährden, die uns der Ozean erweist**

Ein Blick nach vorn:

„Mit WUMMS aus der Krise kommen!“(?)



Das Anthropozän

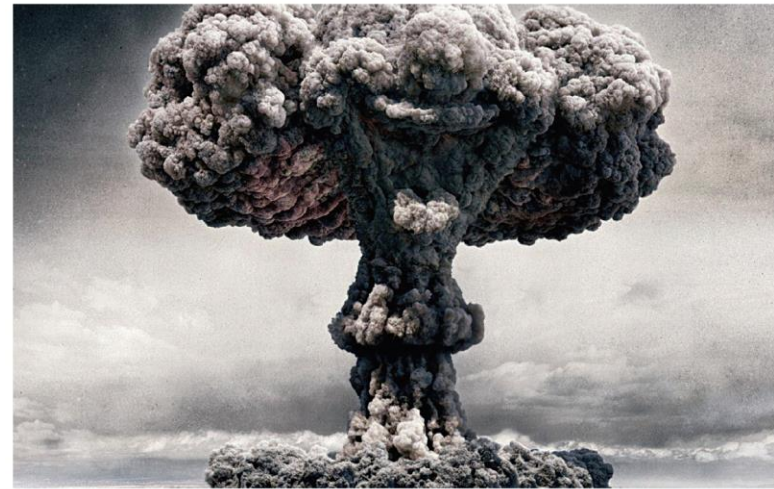
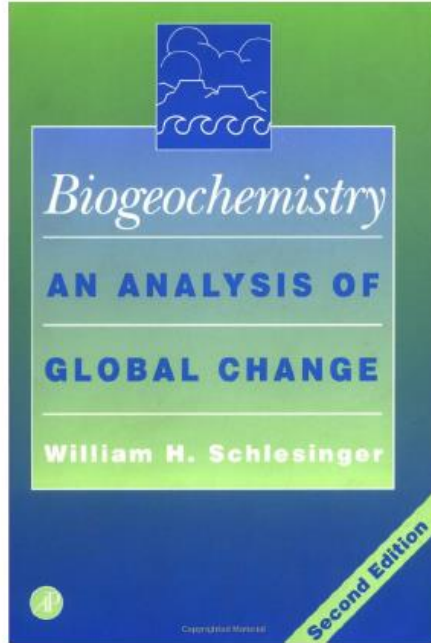


Figure 5 Picture of the mushroom shaped cloud created by an above ground atomic bomb test.

Ein neugieriger Blick auf die Fakten!



Weiterführende links zur Ozeanversauerung

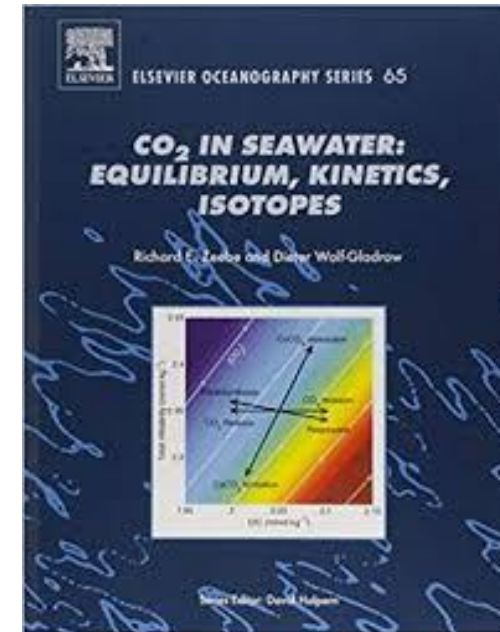
www.iaea.org/ocean-acidification

www.ipcc.ch

www.oceanacidification.org.uk

www.us-ocb.org

www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs



Ocean Carbon & Biogeochemistry Project—
Ocean Acidification
whoi.edu/OCB-OA



Ocean Acidification
International Coordination
Centre
iaea.org/ocean-acidification

Ocean Acidification
International
Coordination
Centre
OA-ICC



Biological Impacts of
Ocean Acidification
www.bioacid.de



UK Ocean Acidification
Research Programme
oceanacidification.org.uk

UK Ocean Acidification
Research Programme



NOAA, Ocean Acidification
Program
oceanacidification.noaa.gov



Washington Sea Grant
wsg.washington.edu
WSG AS-04 November 2013

Danke für die Aufmerksamkeit!

Gibt es Fragen zum Vortrag?

