

Warm, sauer und wenig Sauerstoff – Ozeane unter Stress

u^b

b
UNIVERSITÄT
BERN

FNSNF

SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

Thomas Frölicher

Klima- und Umweltphysik

Oeschger-Zentrum für Klimaforschung

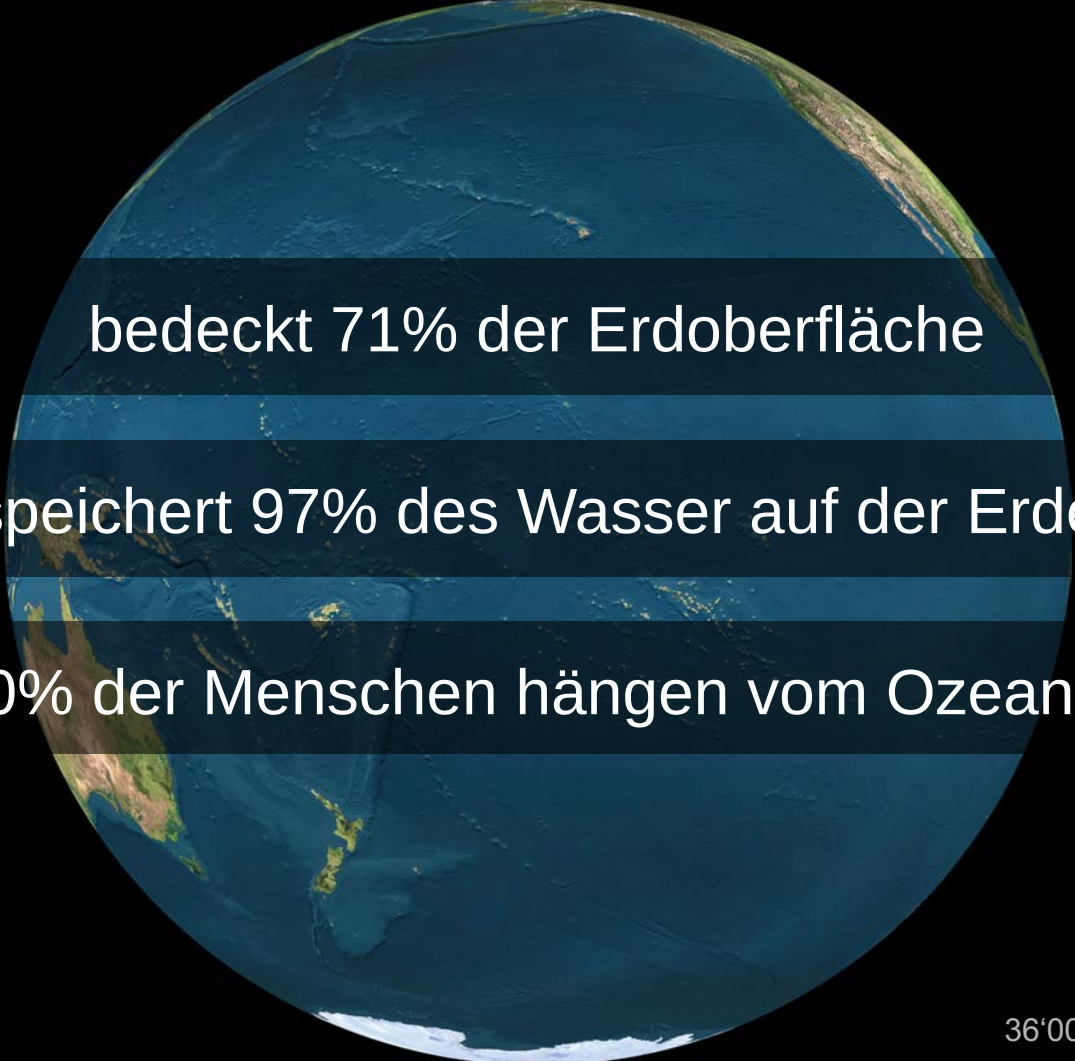
Universität Bern

Email: thomas.froelicher@climate.unibe.ch

Web: www.tfroelicher.com

Volkshochschule Zürich, 31. Januar 2020

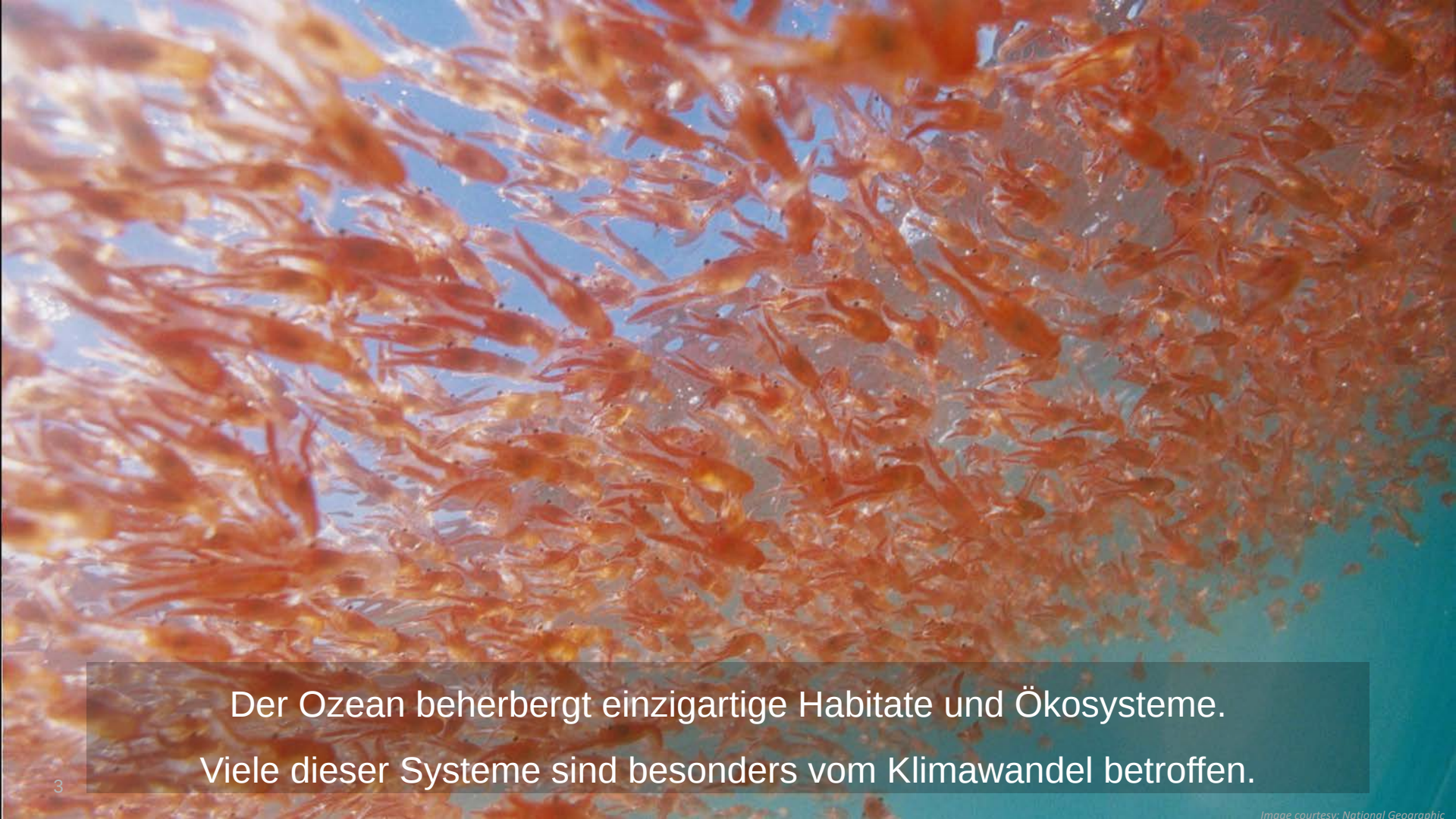




bedeckt 71% der Erdoberfläche

speichert 97% des Wasser auf der Erde

100% der Menschen hängen vom Ozean ab



Der Ozean beherbergt einzigartige Habitate und Ökosysteme.
Viele dieser Systeme sind besonders vom Klimawandel betroffen.

Rund 680 Millionen Leute wohnen nicht mehr als 10 m über dem Meeresspiegel.
Man schätzt, dass diese Zahl bis 2050 auf über 1 Milliarde anwachsen wird.



Der Ozean ist eine essentielle Senke für Wärme und menschgemachtes CO₂.
Das führt zur Erwärmung, Versauerung und zu einem Sauerstoffverlust der Ozeane.



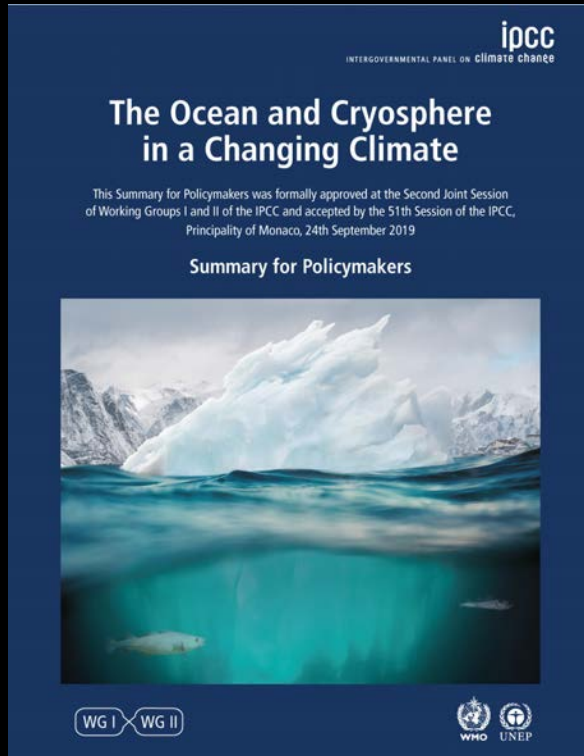
Der Ozean ist eines der 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen

Ziel 14: Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen



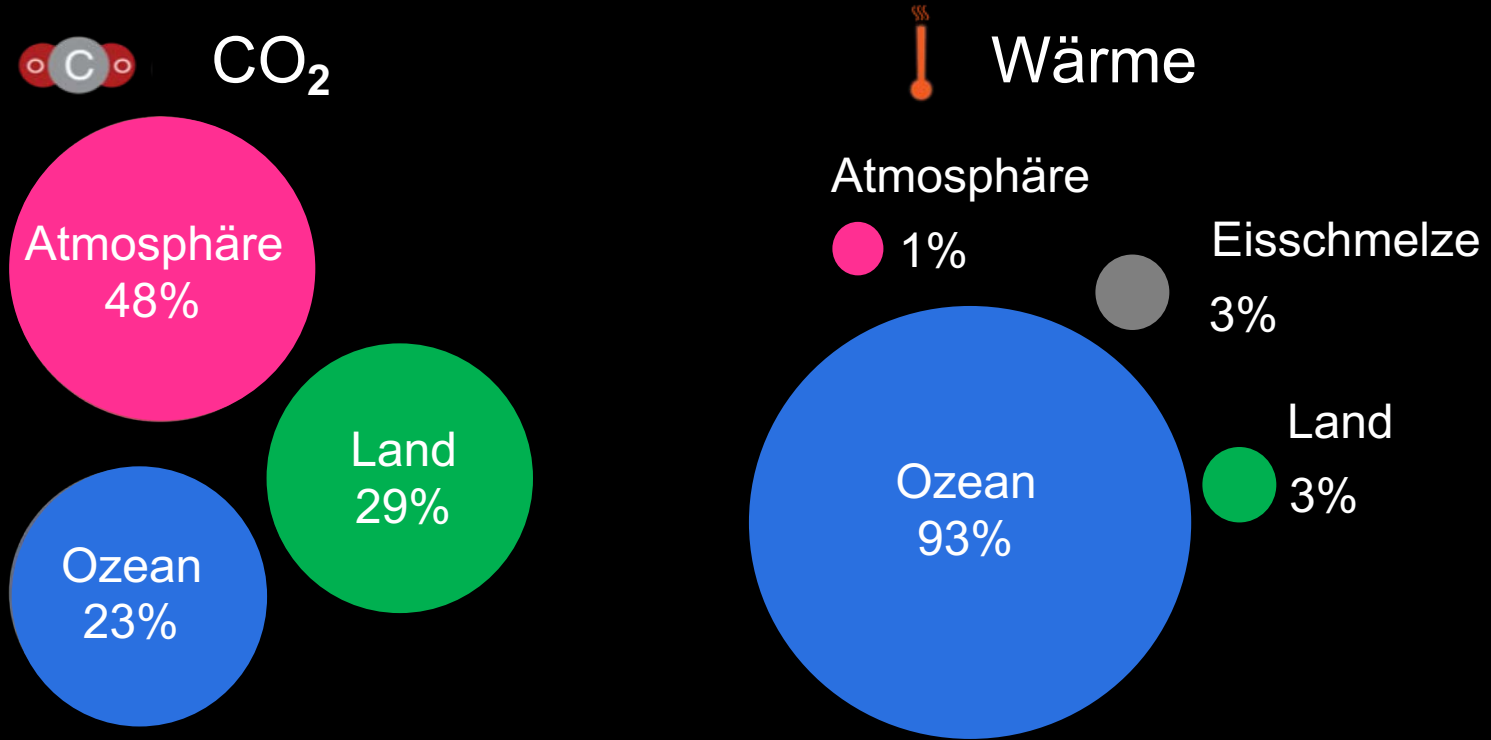
1. Der Ozean im Klimasystem
oder welche Bedeutung spielen die Ozeane im Klimasystem?
2. Der Ozean unter Stress
oder wie wirkt sich der Klimawandel auf die Weltmeere aus?
3. Klimawandel und marine Ökosysteme
oder was bedeuten diese Änderungen für marine Lebewesen?

IPCC Sonderbericht über die Ozeane und die Kryosphäre

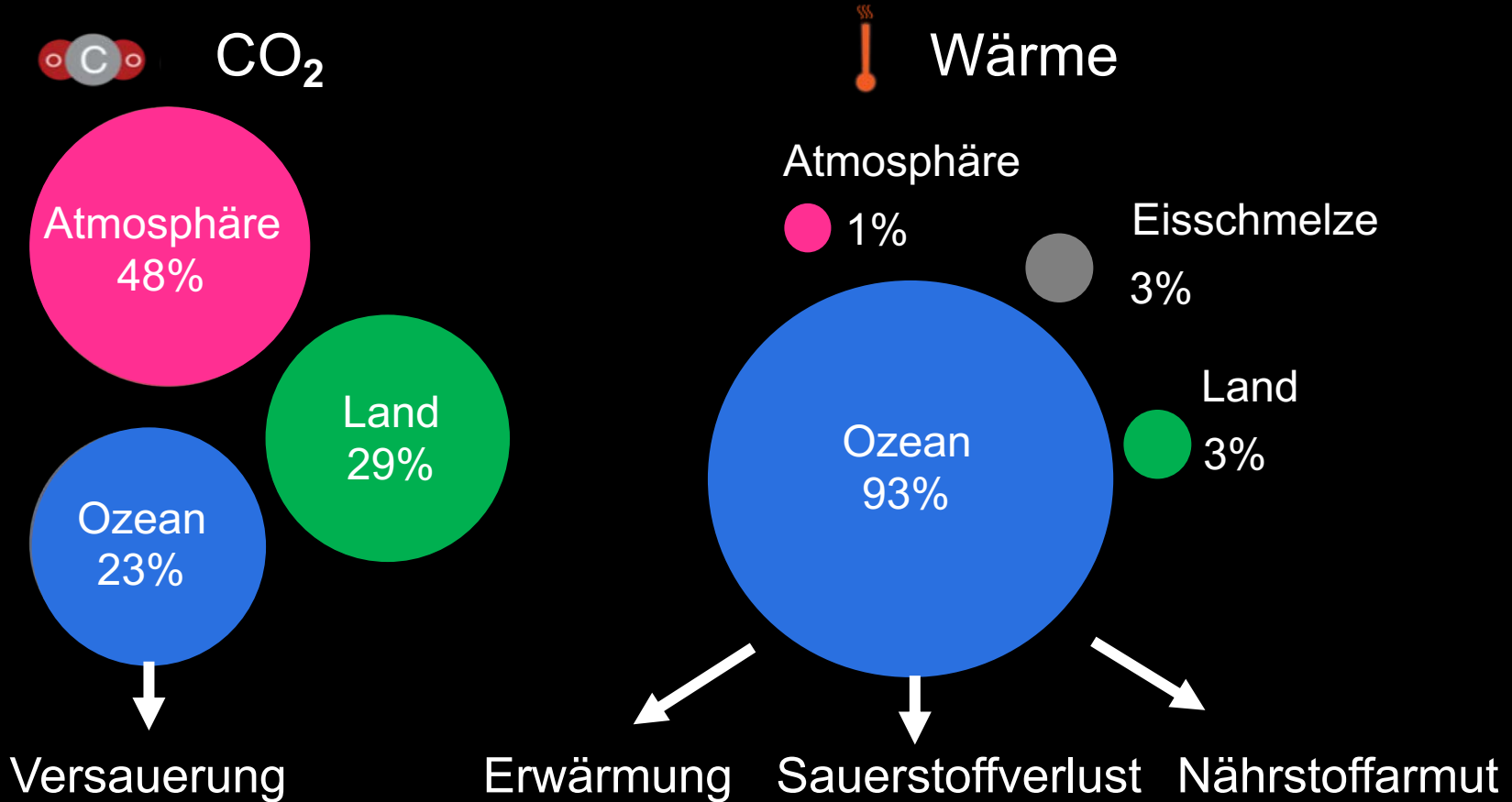


104 Autoren (31% Frauen; 36 Länder) – 6981 Studien – 31'176 Kommentare

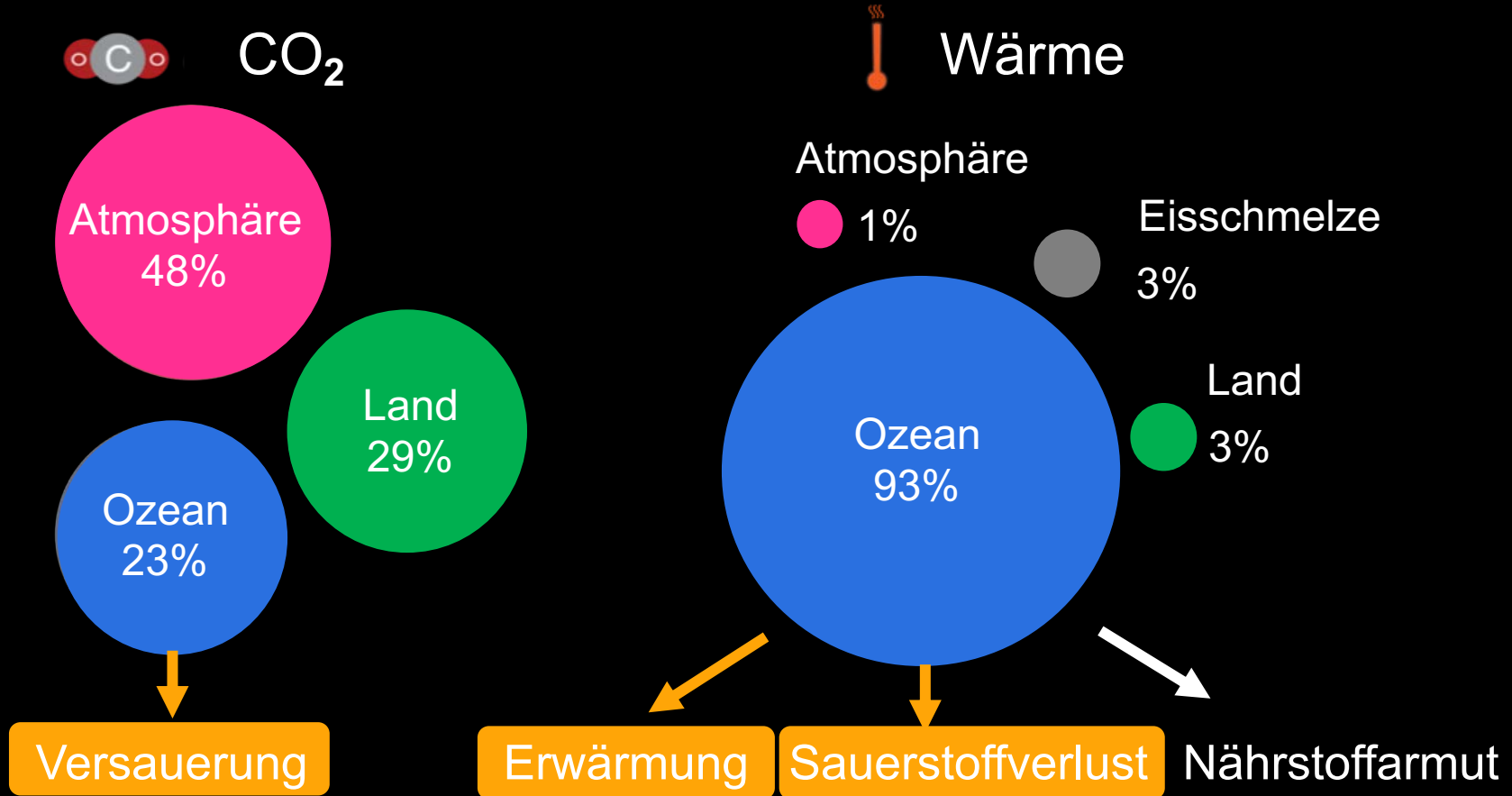
Der Ozean verlangsamt die Erwärmung



Der Ozean verlangsamt die Erwärmung, aber...

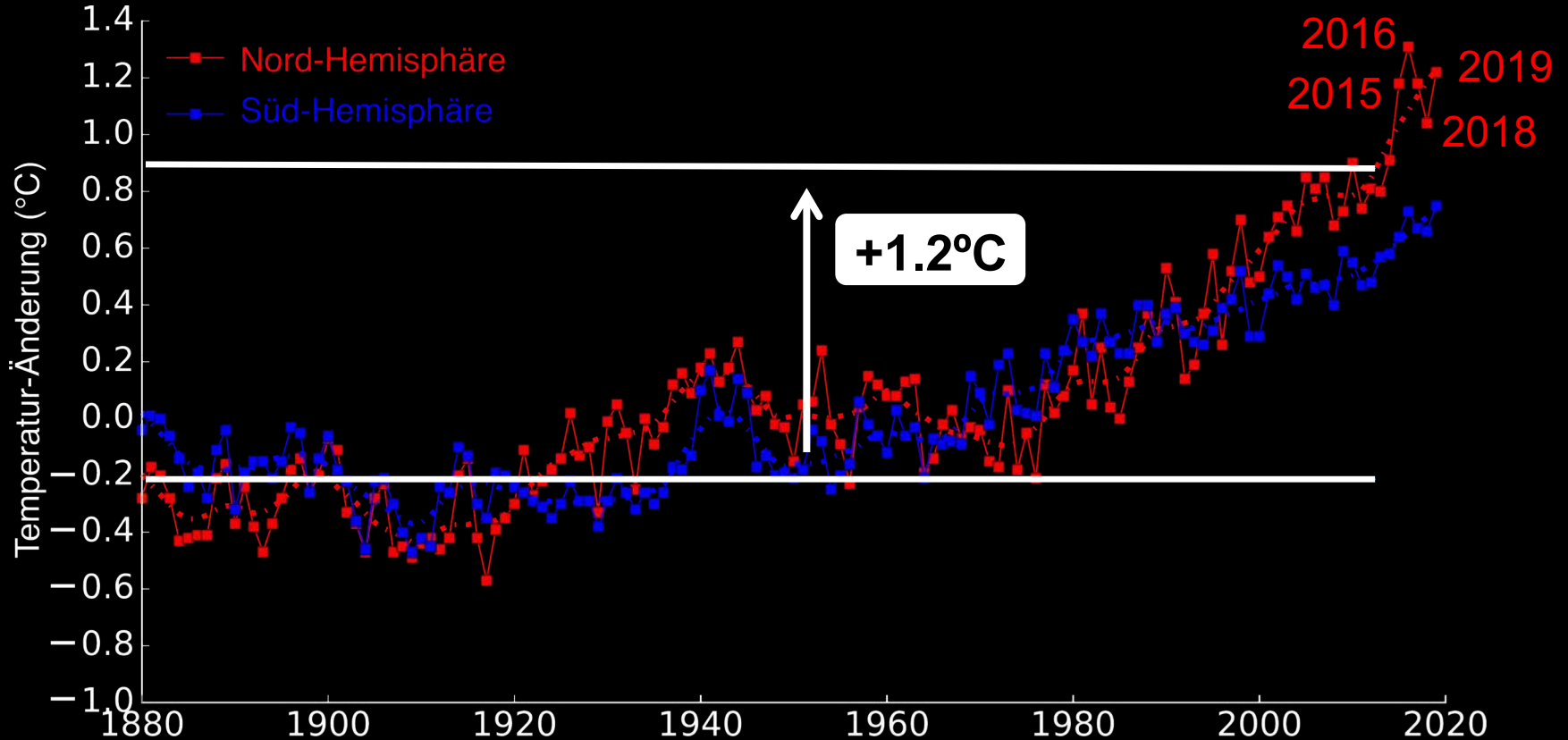


Der Ozean verlangsamt die Erwärmung, aber...

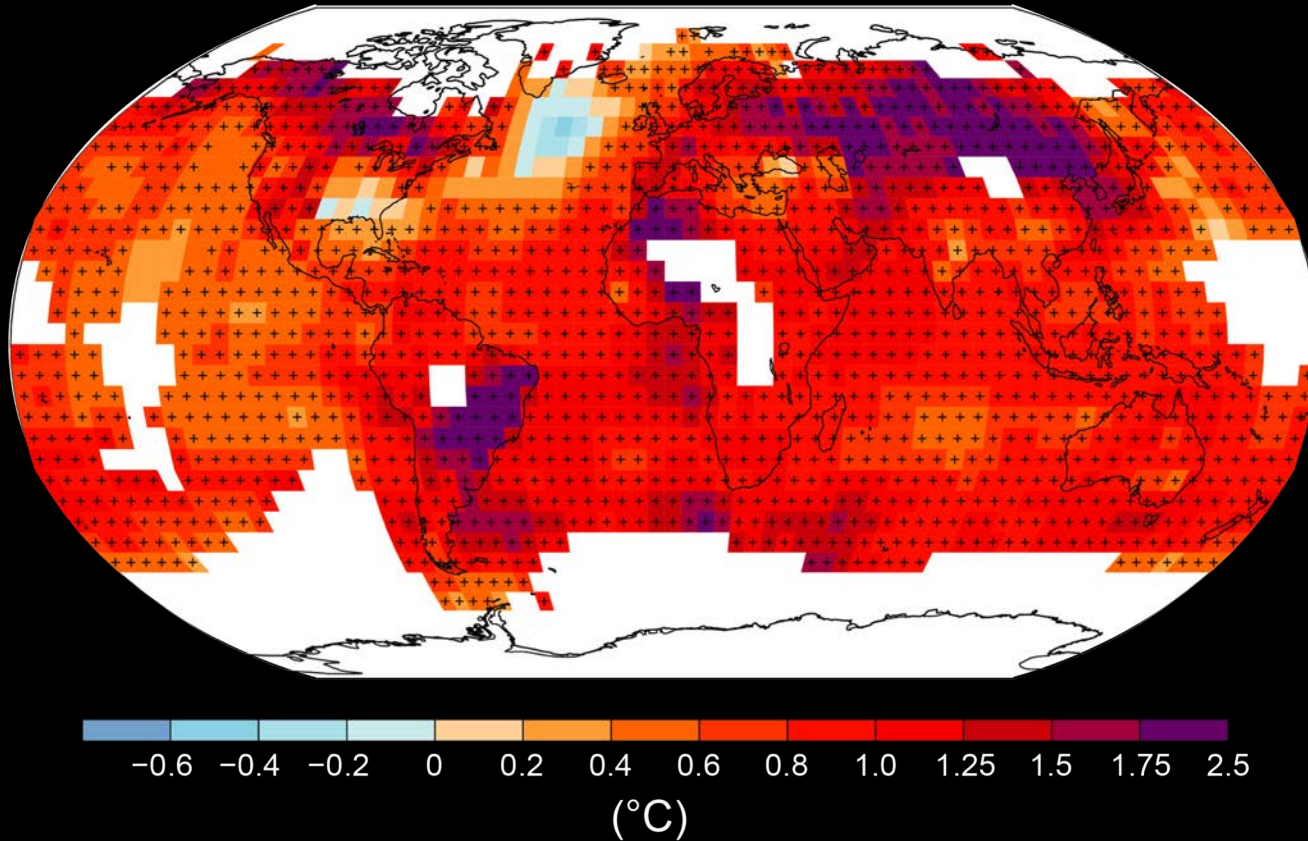


1. Der Ozean im Klimasystem
oder welche Bedeutung spielen die Ozeane im Klimasystem?
2. Der Ozean unter Stress
oder wie wirkt sich der Klimawandel auf die Weltmeere aus?
3. Klimawandel und marine Ökosysteme
oder was bedeuten diese Änderungen für marine Lebewesen?

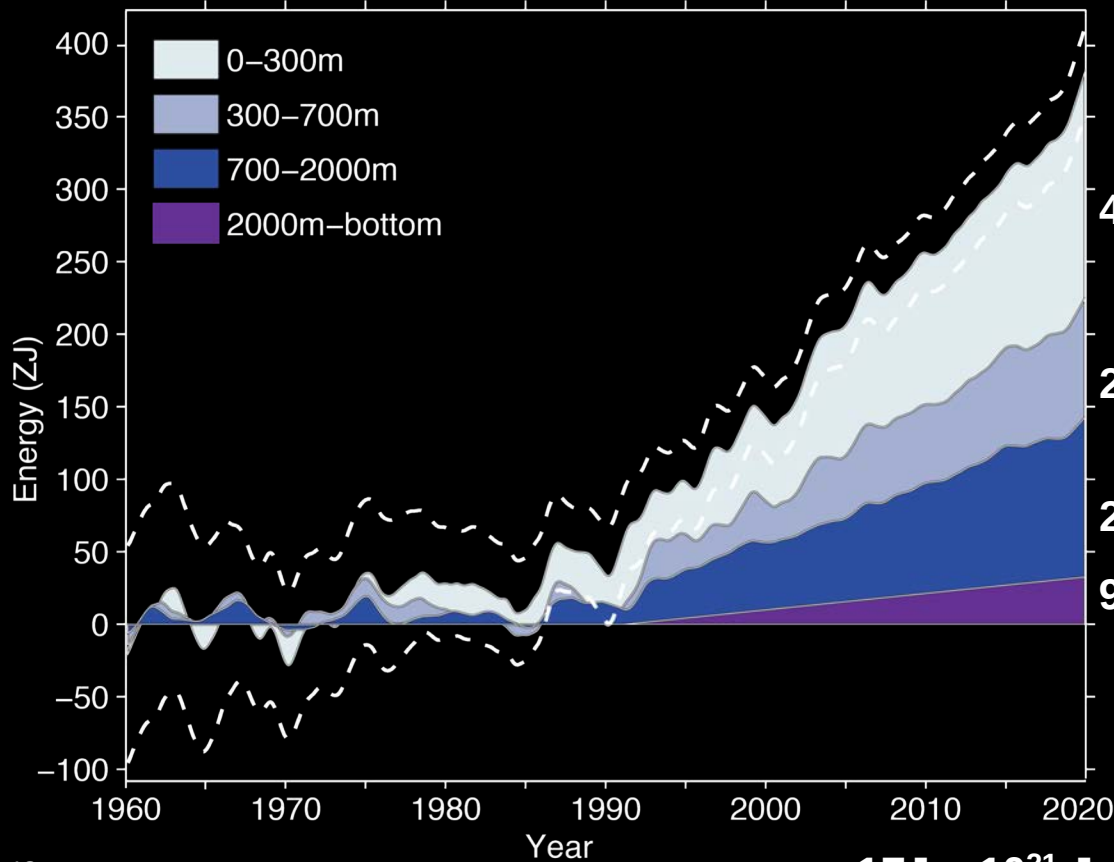
Globale Temperaturänderung: jährlich gemittelt



Räumliche Änderung der Temperatur: 1901 - 2012



Der Ozean erwärmt sich



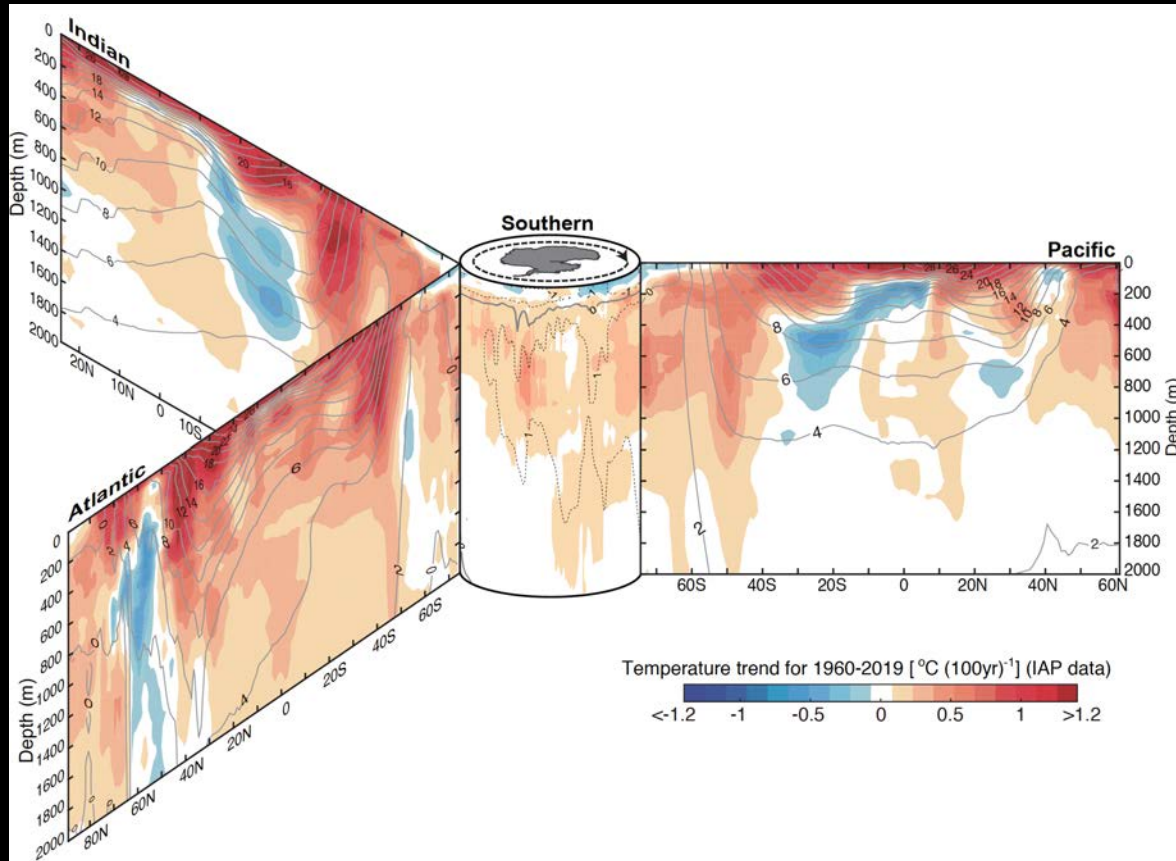
1ZJ = 10^{21} J

↑ 103 Millionen TWh oder 0.04°C

215'000 x

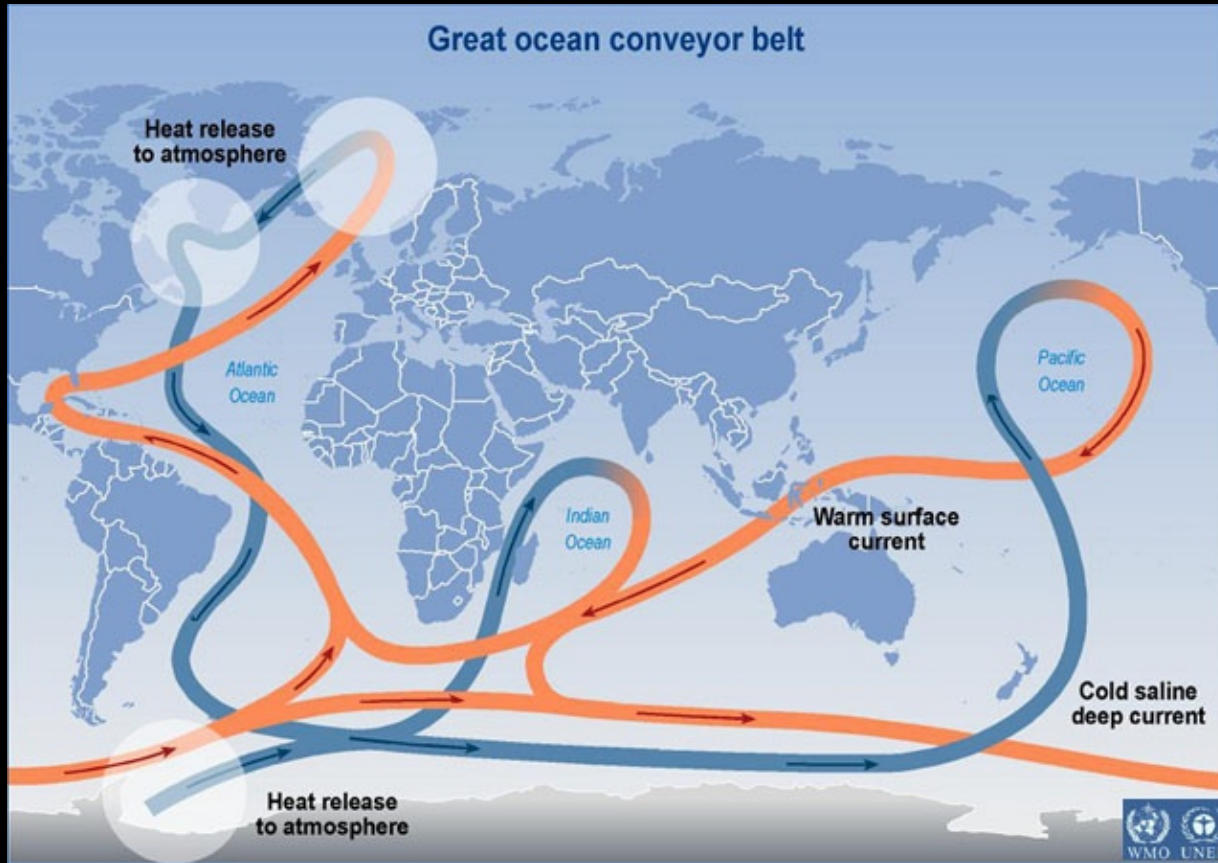


Die grösste Wärmeaufnahme erfolgte im Südpolarmeer und im Nordatlantik



Exkurs 1: Ozeanzirkulation

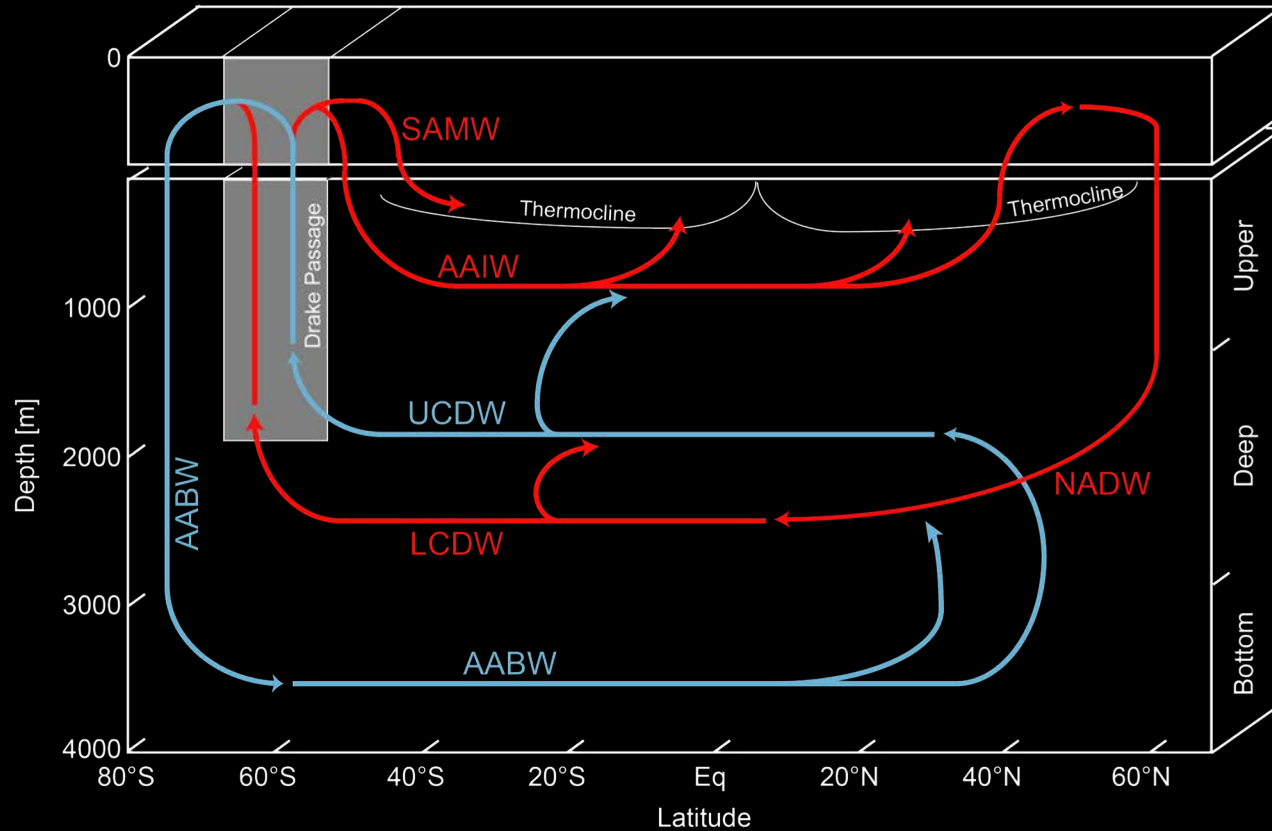
Thermohaline Zirkulation



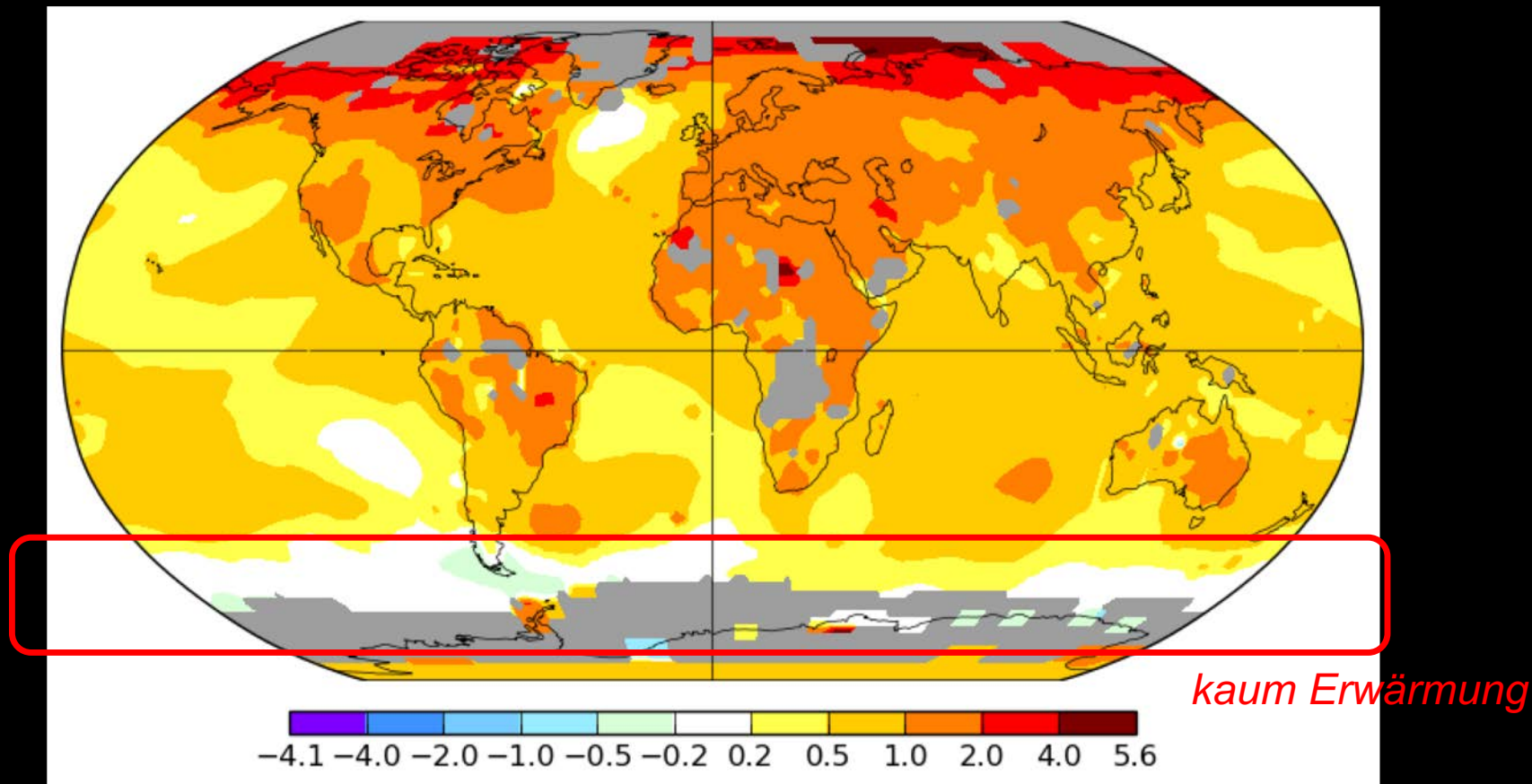
— Oberflächenströmungen

— Tiefenströmungen

Die globale Tiefenzirkulation

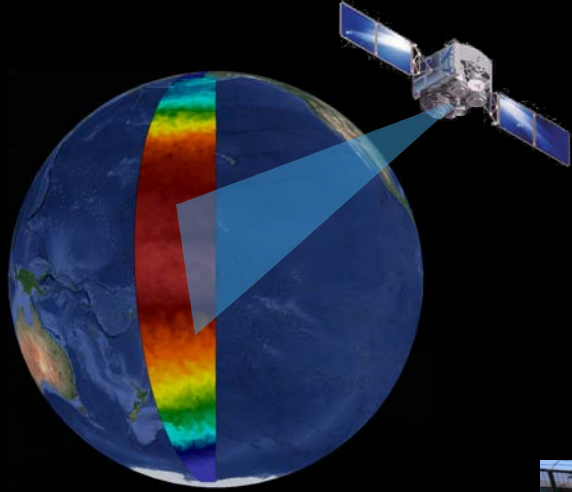


Beobachtete Erwärmung der letzten 50 Jahre



Exkurs 2: Wie misst man die Temperatur des Ozeans?

Temperaturmessungen im Ozean



Satelliten

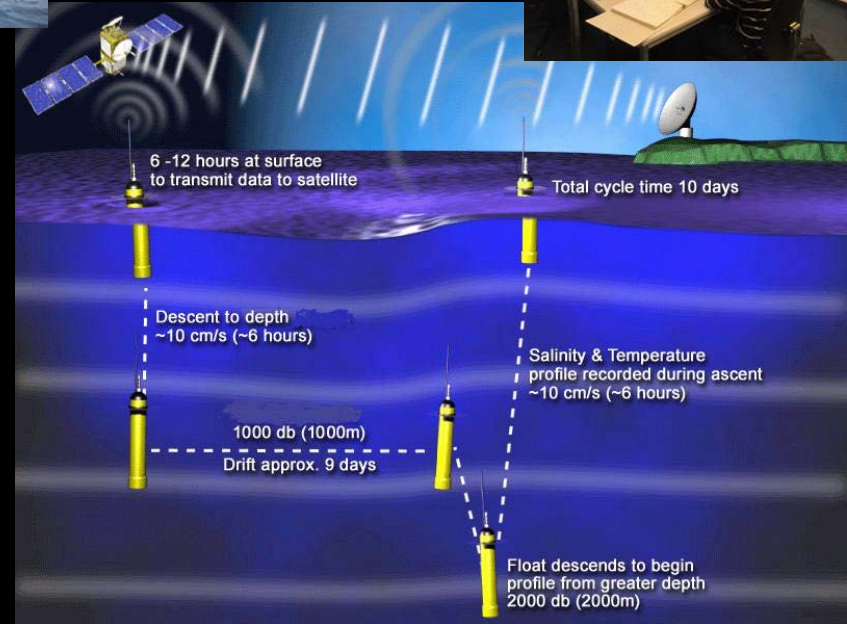
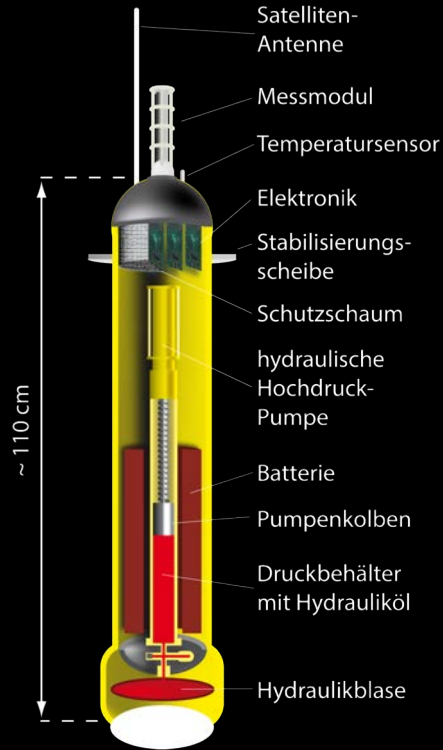
Schiff: CTD Rosette



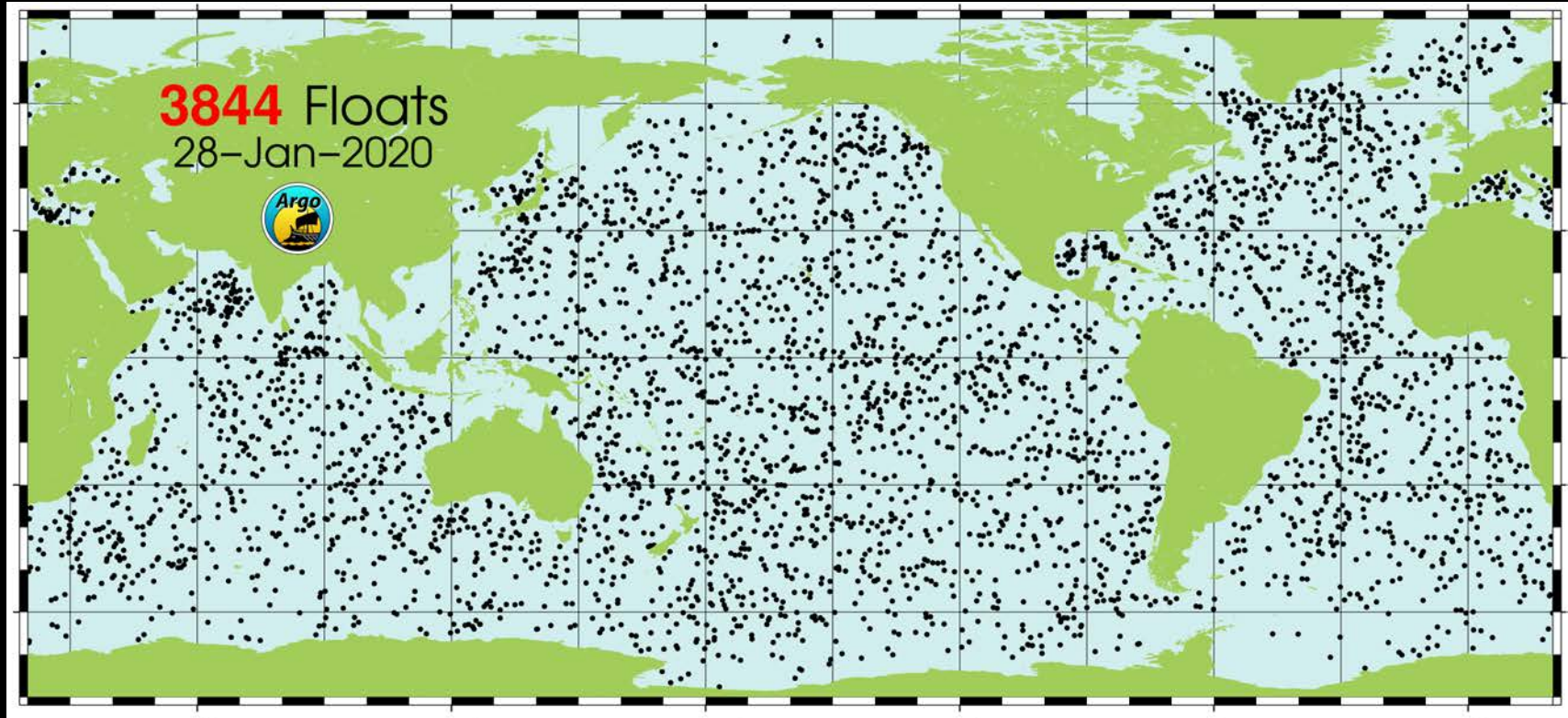
Bio-Logging

Hussey et al. (2015, Science)

Hochaufgelöste Temperaturmessungen im Ozean: Argo-Treibbojen



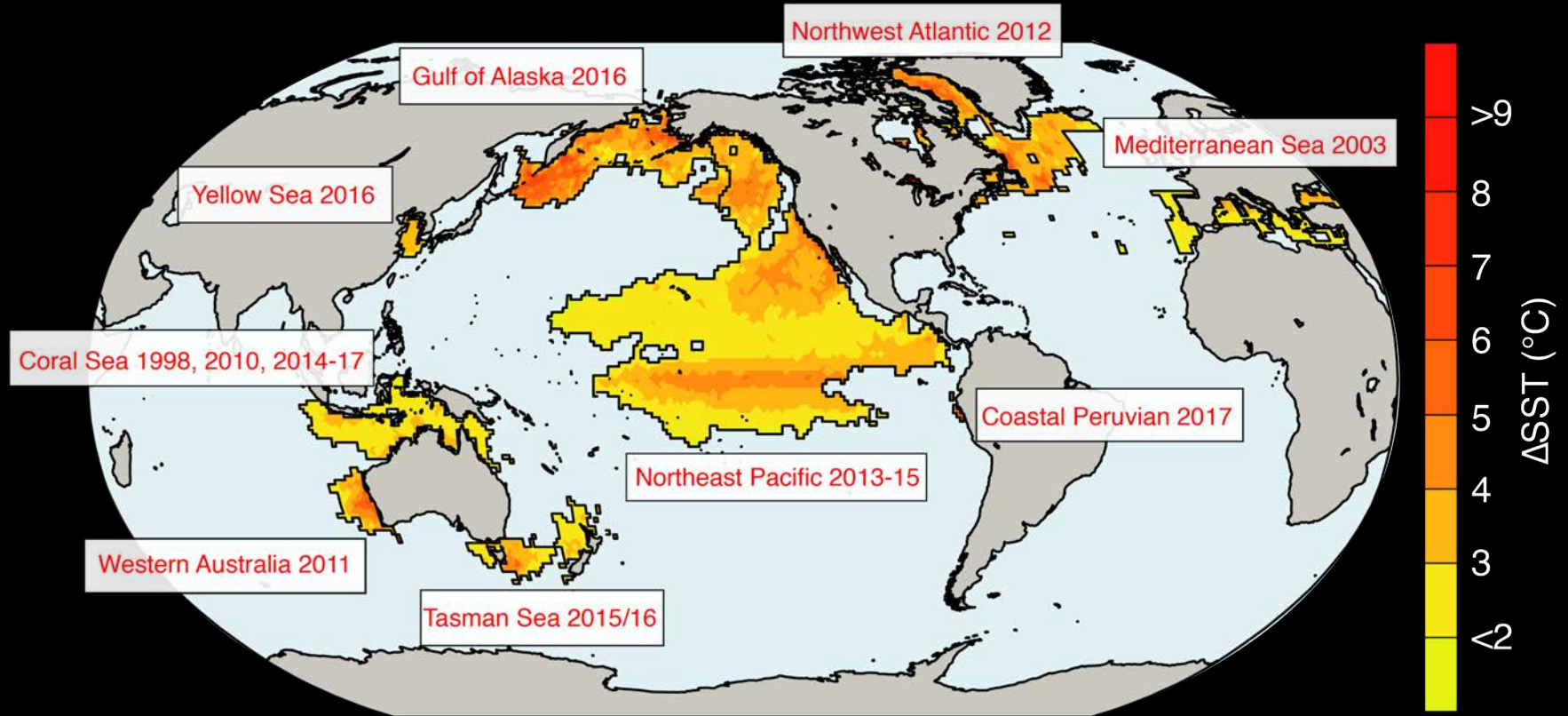
Hochaufgelöste Temperaturmessungen im Ozean: Argo-Treibbojen



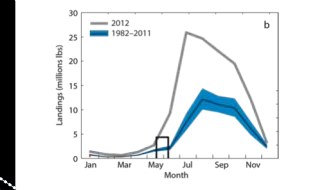
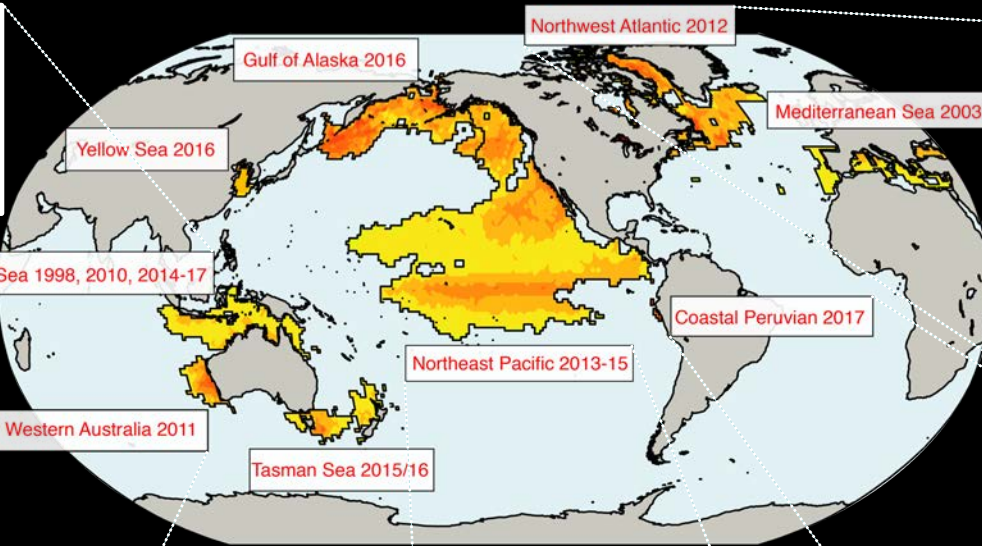
www.argo.ucsd.edu

Hitzewellen im Ozean

Räumliche Ausdehnung und Intensität vergangener mariner Hitzewellen



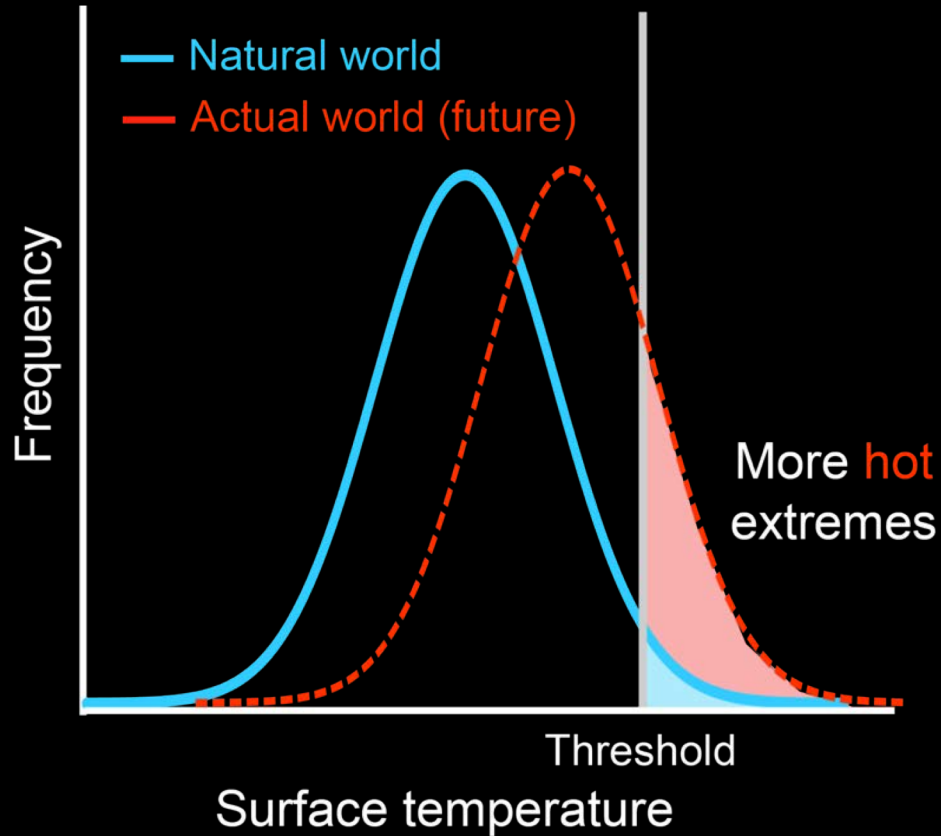
Marine Hitzewellen bedrohen marine Ökosysteme



Frölicher and Laufkötter (2018, Nature Communications)

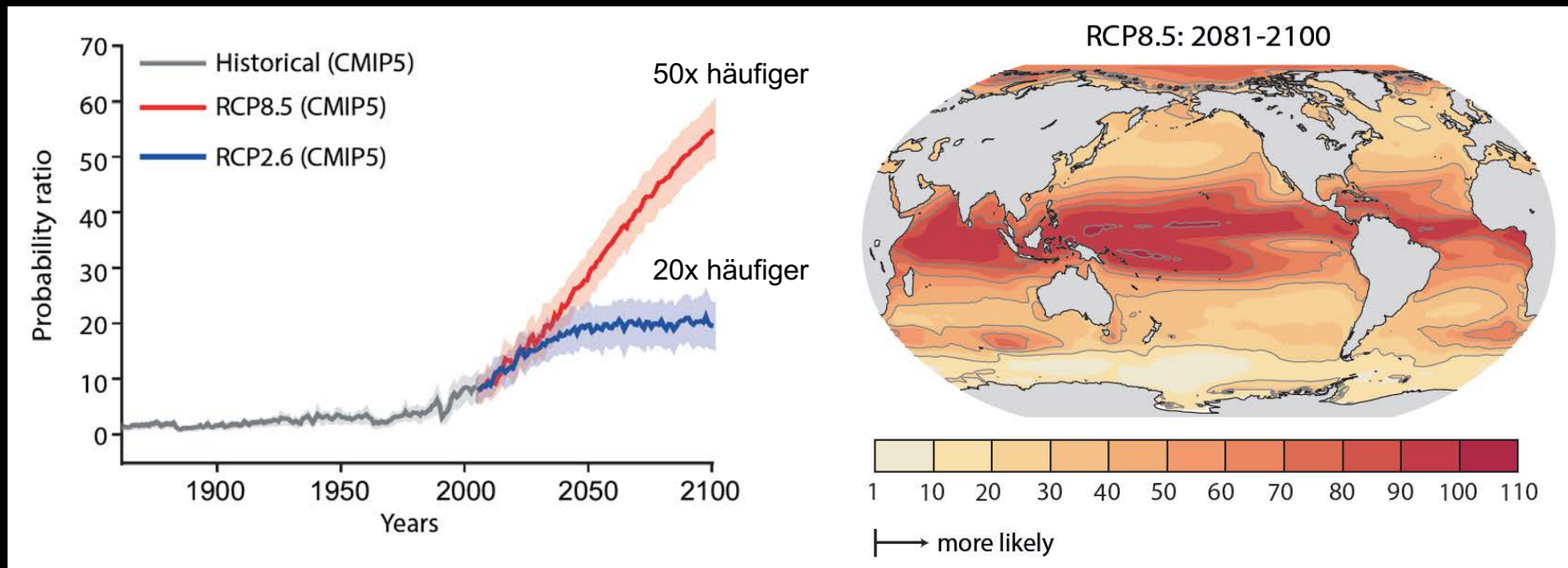


Mehr Extremereignisse durch Klimawandel



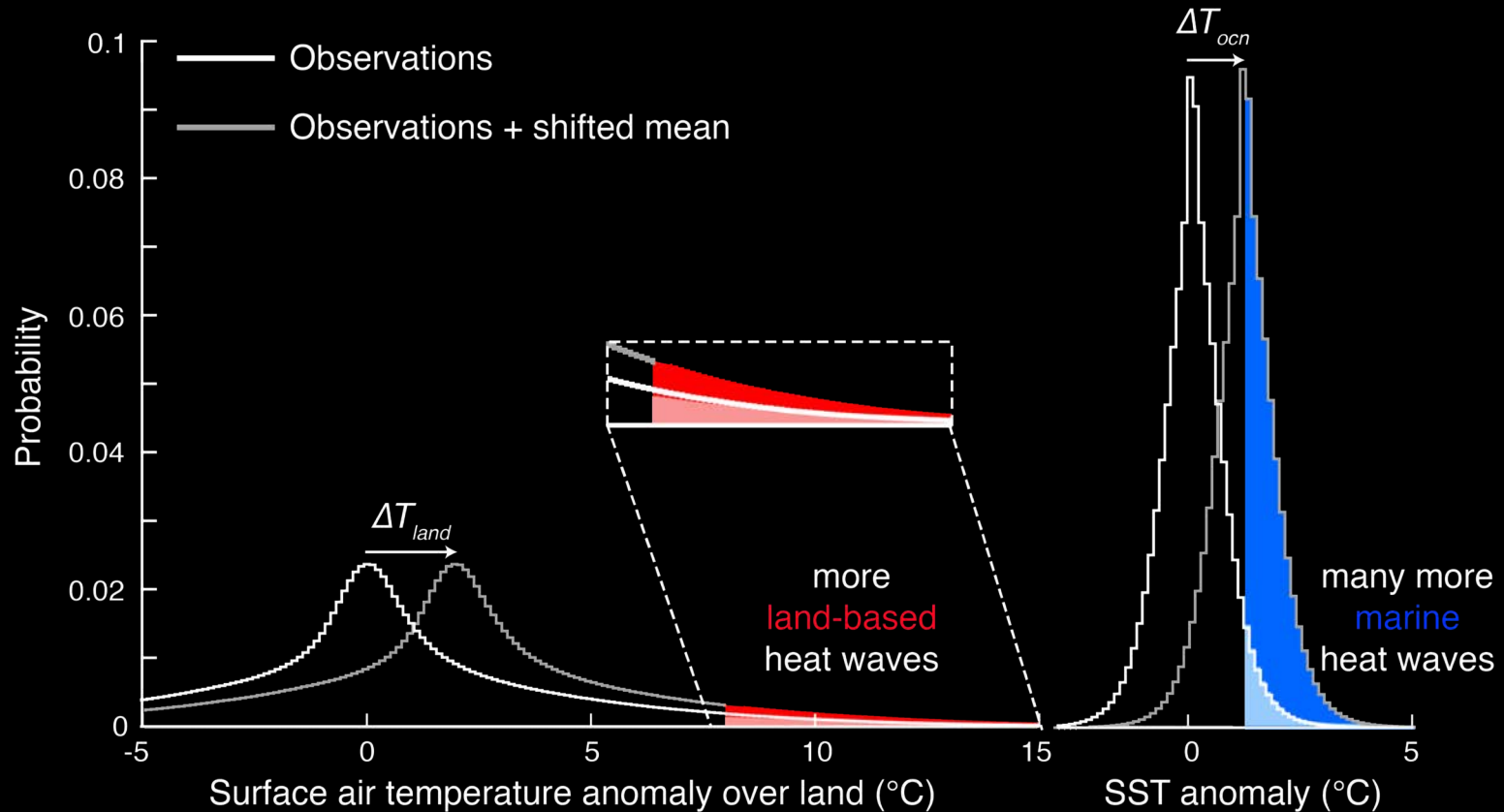
Starke Zunahme von marinen Hitzewellen mit steigender Temperatur

Probability ratio = P_1 / P_0



Collins et al. (2019) SROCC Chapter 6; basierend auf Frölicher et al. (2018, Nature)

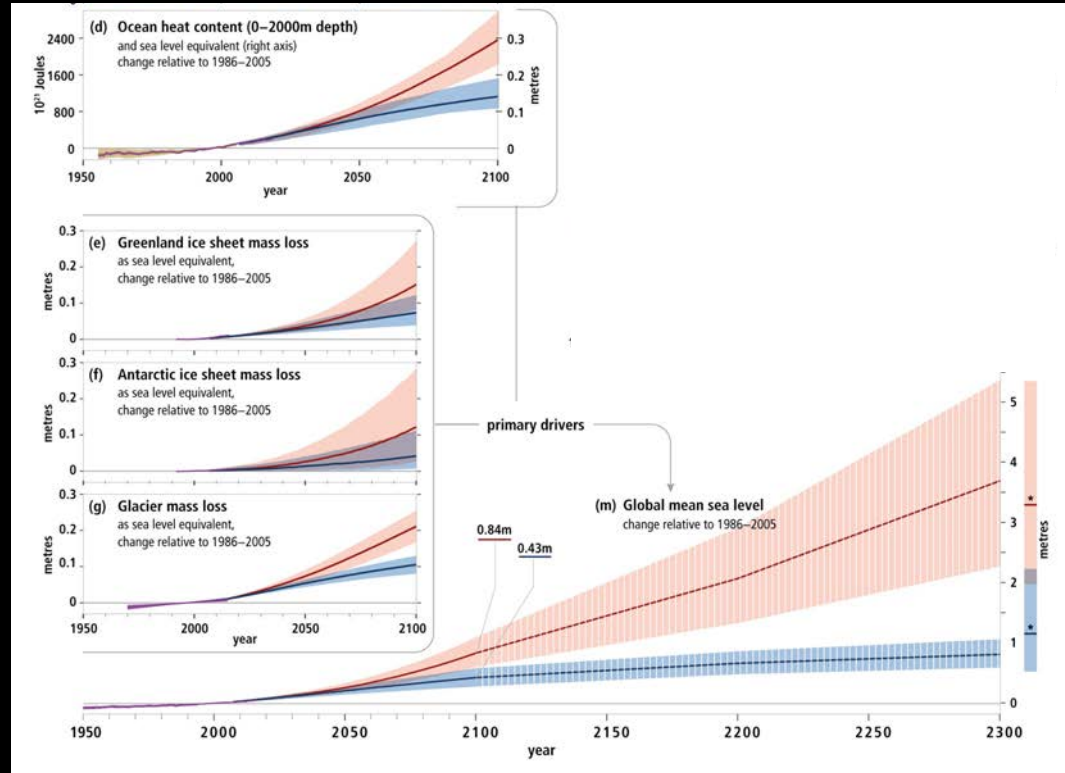
Marine Hitzewellen versus Hitzewellen über dem Land





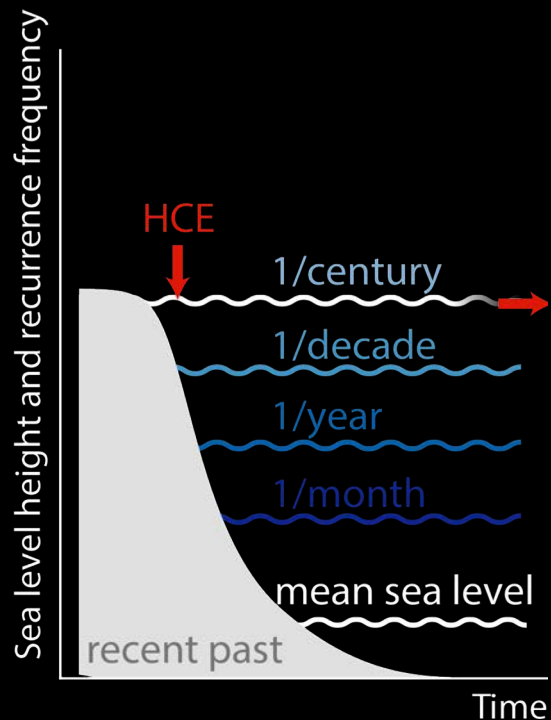
Meeresspiegel

Der Meeresspiegelanstieg wird weiter zunehmen, wobei Prognosen für längere Zeiträume sehr unsicher sind



- Während des 20. Jahrhunderts stieg der globale Meeresspiegel um **16 cm**
- Der Meeresspiegel steigt derzeit mehr als **doppelt so schnell** und wird sich weiter beschleunigen
- Es gibt kein plausibles Szenario, das den Anstieg in diesem Jahrhundert aufhält
- Die Projektionen wurden seit AR5 **um 10 cm nach oben korrigiert**
- Anstieg des Meeresspiegels **hält auch nach 2100 an**

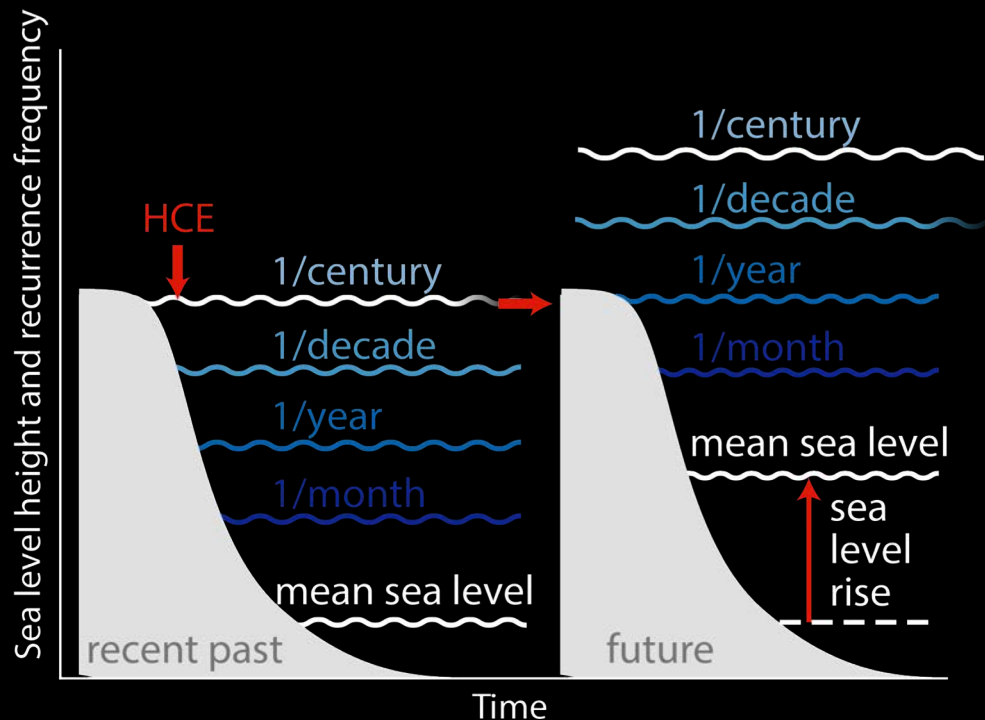
Hochwasserereignisse an Küsten durch Flut oder starke Stürme



Venedig, November 2019

IPCC (2019) SROCC SPM

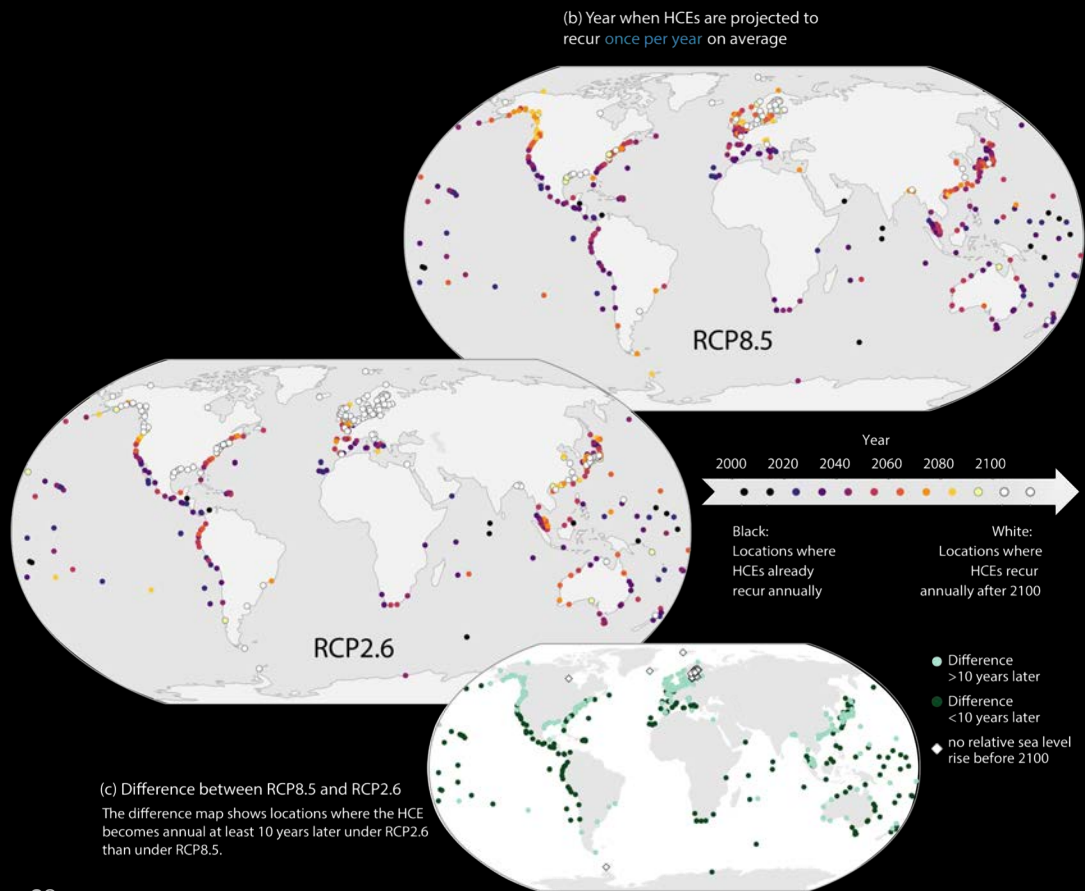
Hochwasserereignisse an Küsten durch Flut oder starke Stürme



Venedig, November 2019

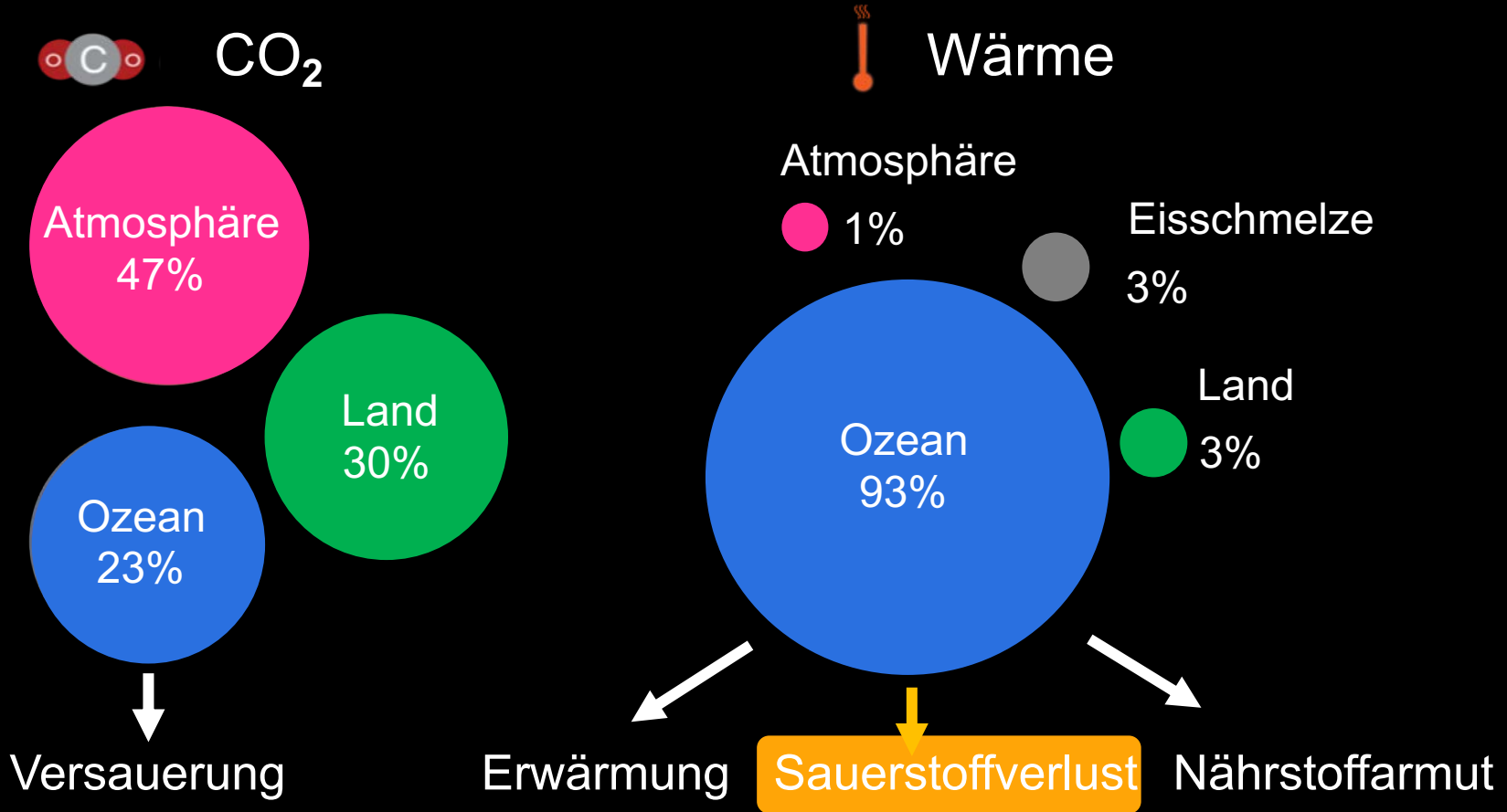
IPCC (2019) SROCC SPM

Zukünftige Hochwasserereignisse an Küsten

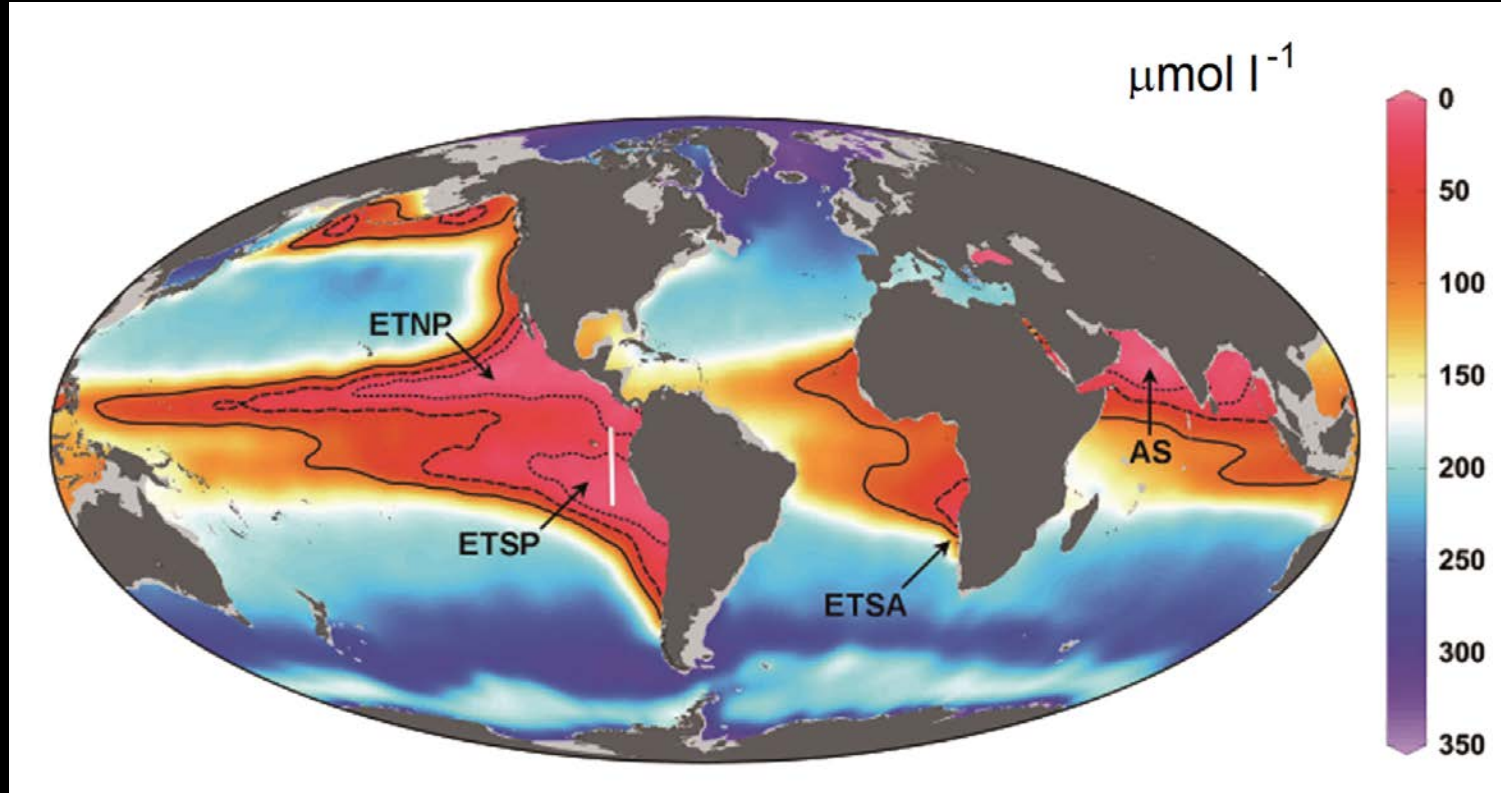


- Extreme Hochwasserereignisse die heutzutage bei Flut oder starken Stürmen selten auftreten, **werden häufiger**
- Viele **tiefliegende Küstenstädte** und **kleine Inseln** werden **bis 2050 jährlich** dem Risiko von Überschwemmungen ausgesetzt sein
- Die Gefahren werden durch die **zunehmende Intensität tropischer Wirbelstürme** verschärft

Der Ozean verlangsamt die Erwärmung, aber...

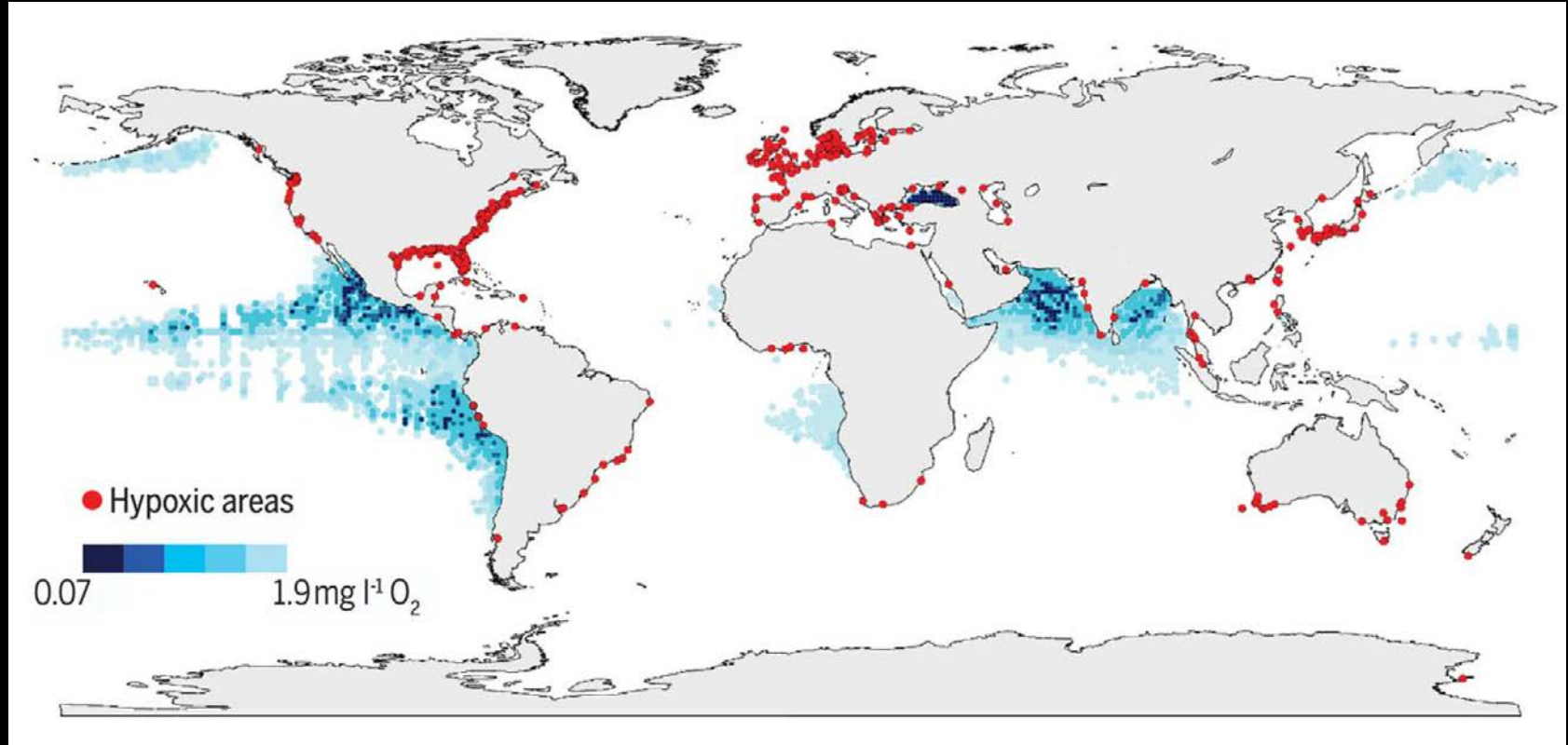


Heutige Sauerstoffverteilung auf 300m Tiefe



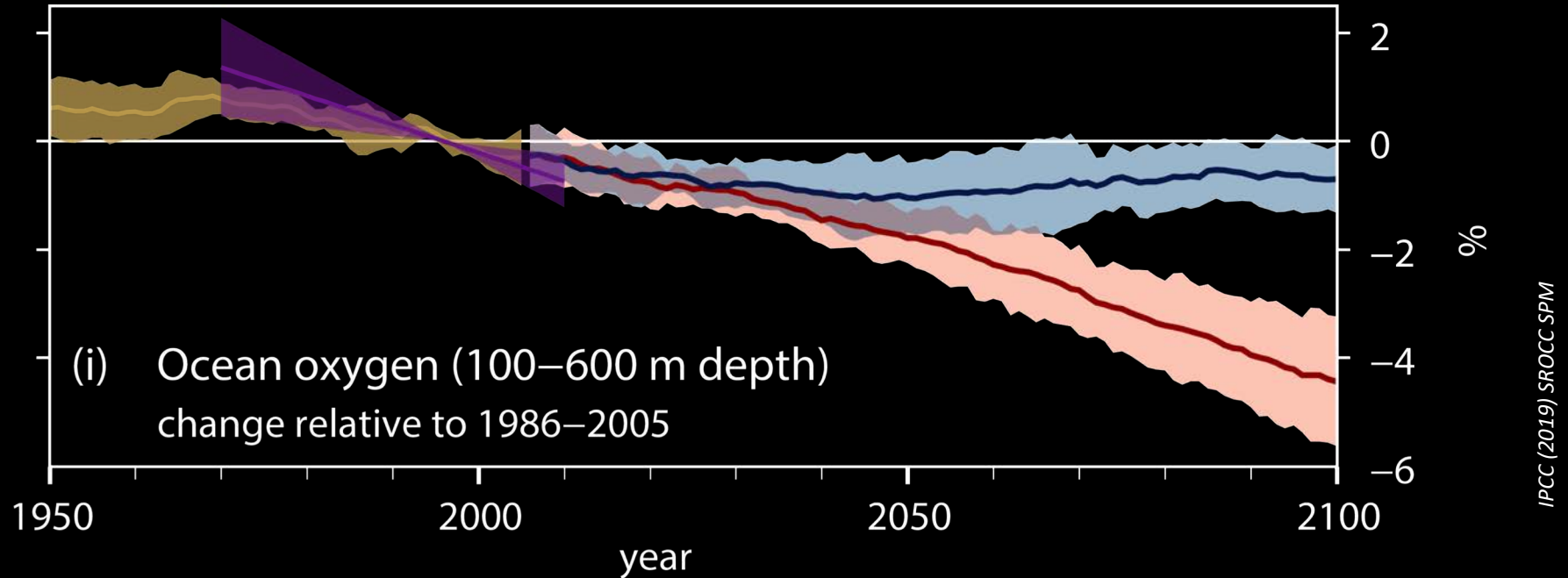
Breitbart et al. (2018, Science)

Sauerstoffmangel durch Überdüngung der Küstengebiete



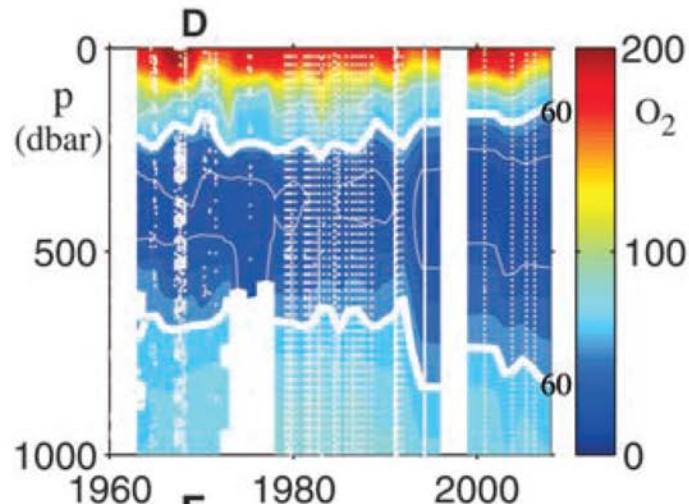
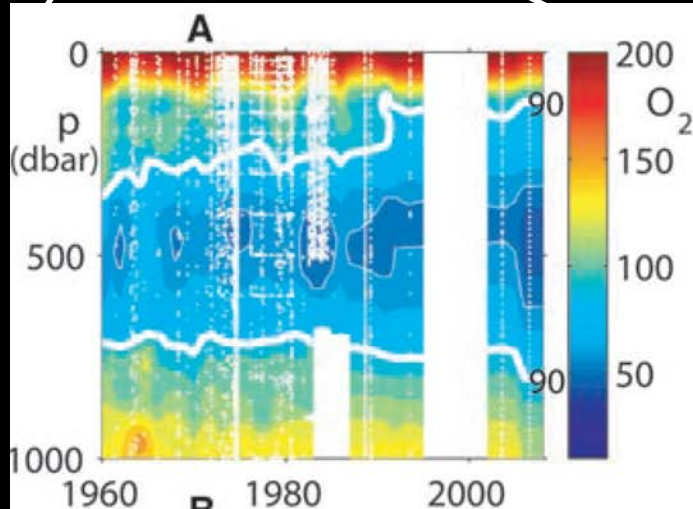
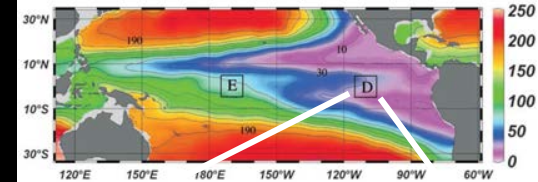
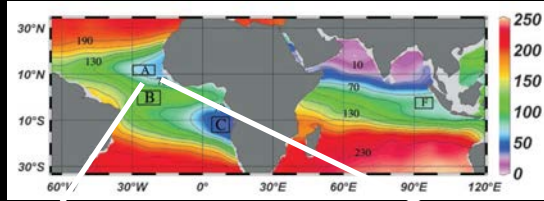
Breitburg et al. (2018, Science)

Der Ozean verliert Sauerstoff



- **Seit 1970** hat der Sauerstoffgehalt in den **obersten 1000m um 0.5-3.3% abgenommen**
- Der Sauerstoffgehalt nimmt bis 2100 **um weitere 1-2% (RCP2.6)** bzw. **3-4% (RCP8.5)** ab

Ausdehnung von Sauerstoffminimumzonen

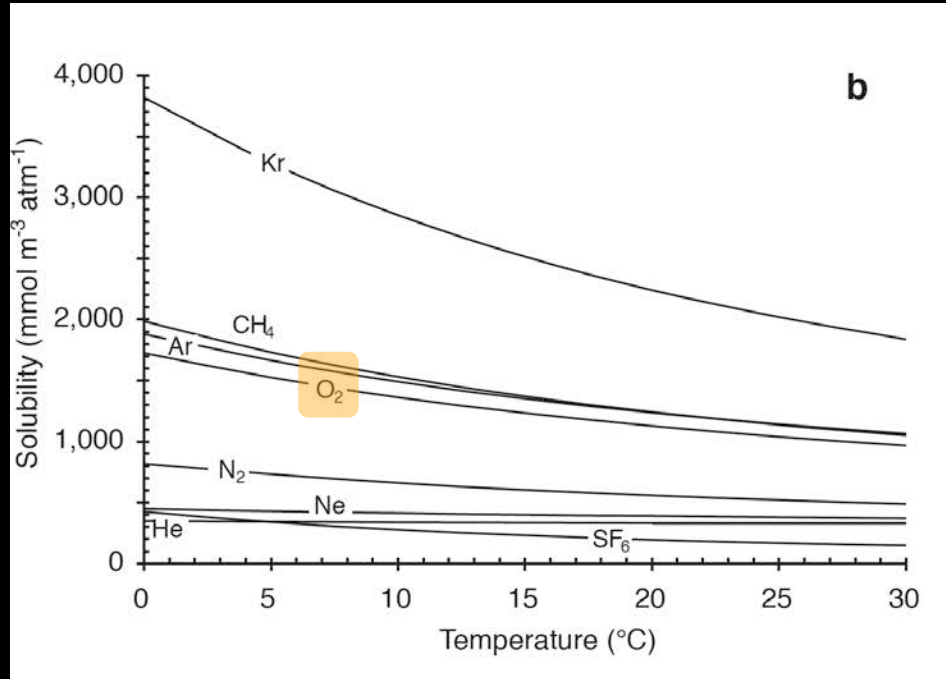


Stramma et al. (2008, Science)

Seit 1960 haben sich die Sauerstoffminimumzonen ausgedehnt

Wieso nimmt die
Sauerstoffkonzentration ab?

Löslichkeit von verschiedenen Gasen

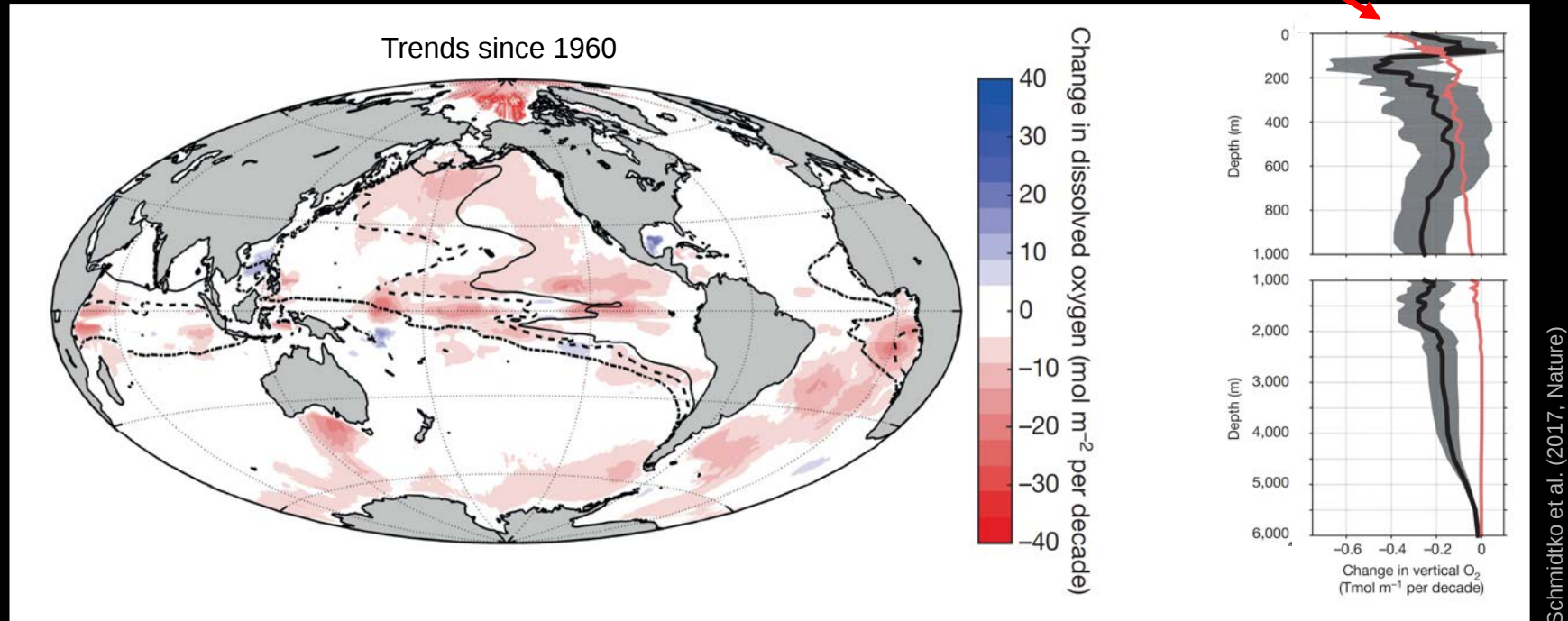


Sarmiento and Gruber (2006)

- Die Löslichkeit sinkt mit steigender Temperatur
- Die Löslichkeit eines Gases steigt mit steigendem molekularem Gewicht

Die Weltmeere verlieren Sauerstoff

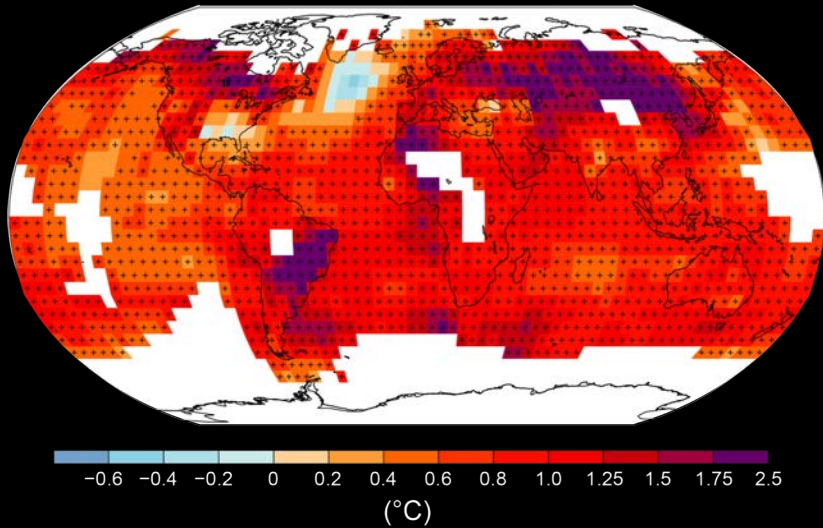
Löslichkeitseffekt



15% der Sauerstoffabnahme ist direkt auf höhere Wassertemperaturen zurückzuführen

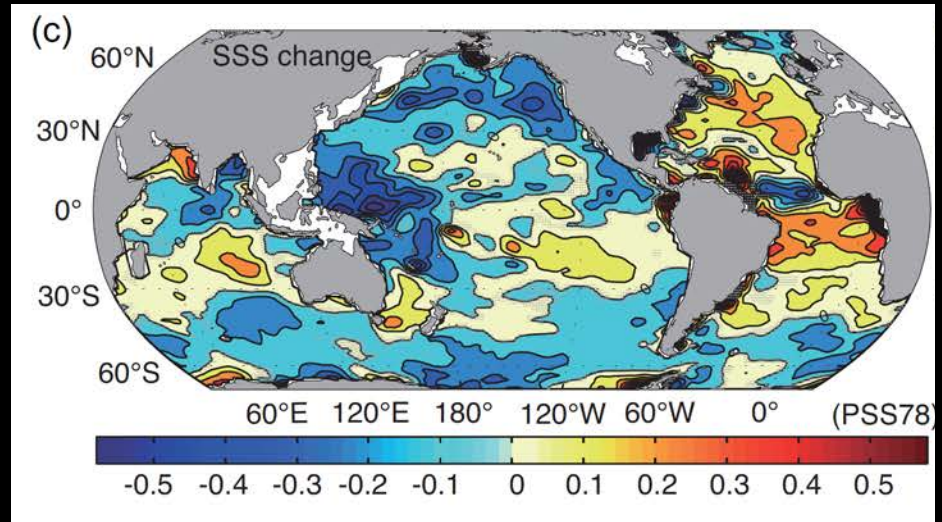
Temperatur- und Salzveränderung im Ozean

Temperatur



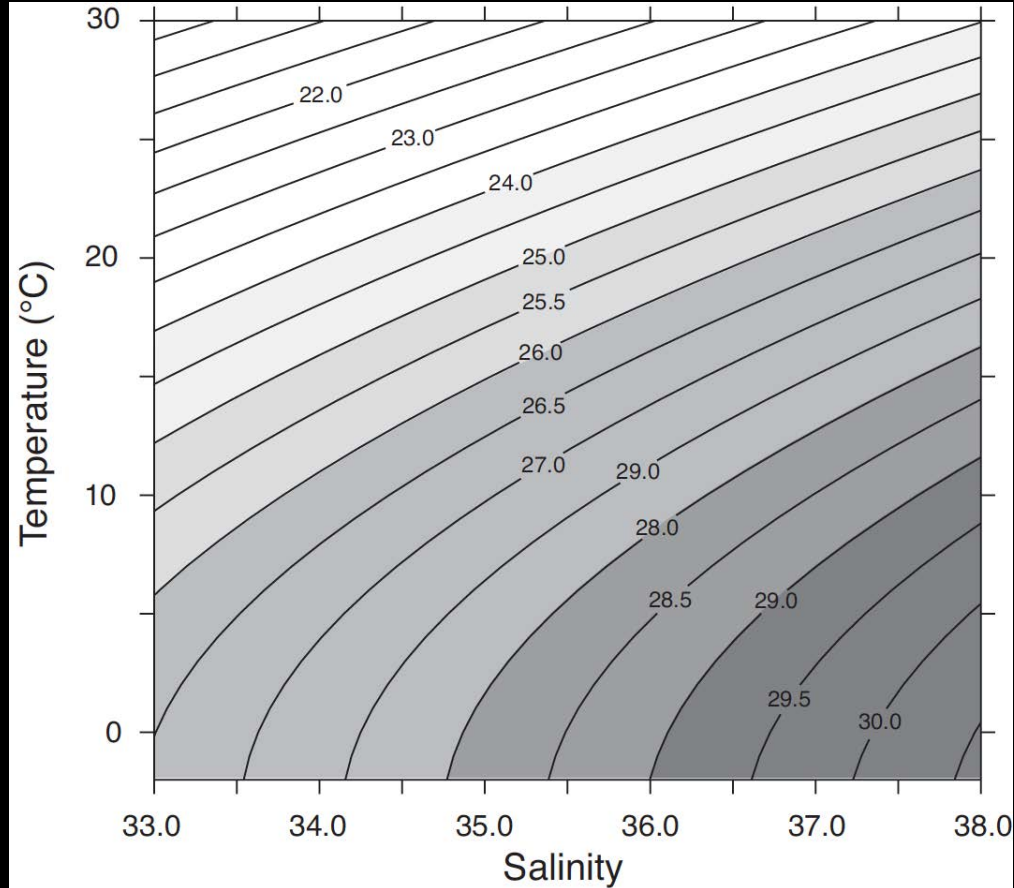
IPCC (2013)

Salinität (Cl⁻, Na⁺, etc.)

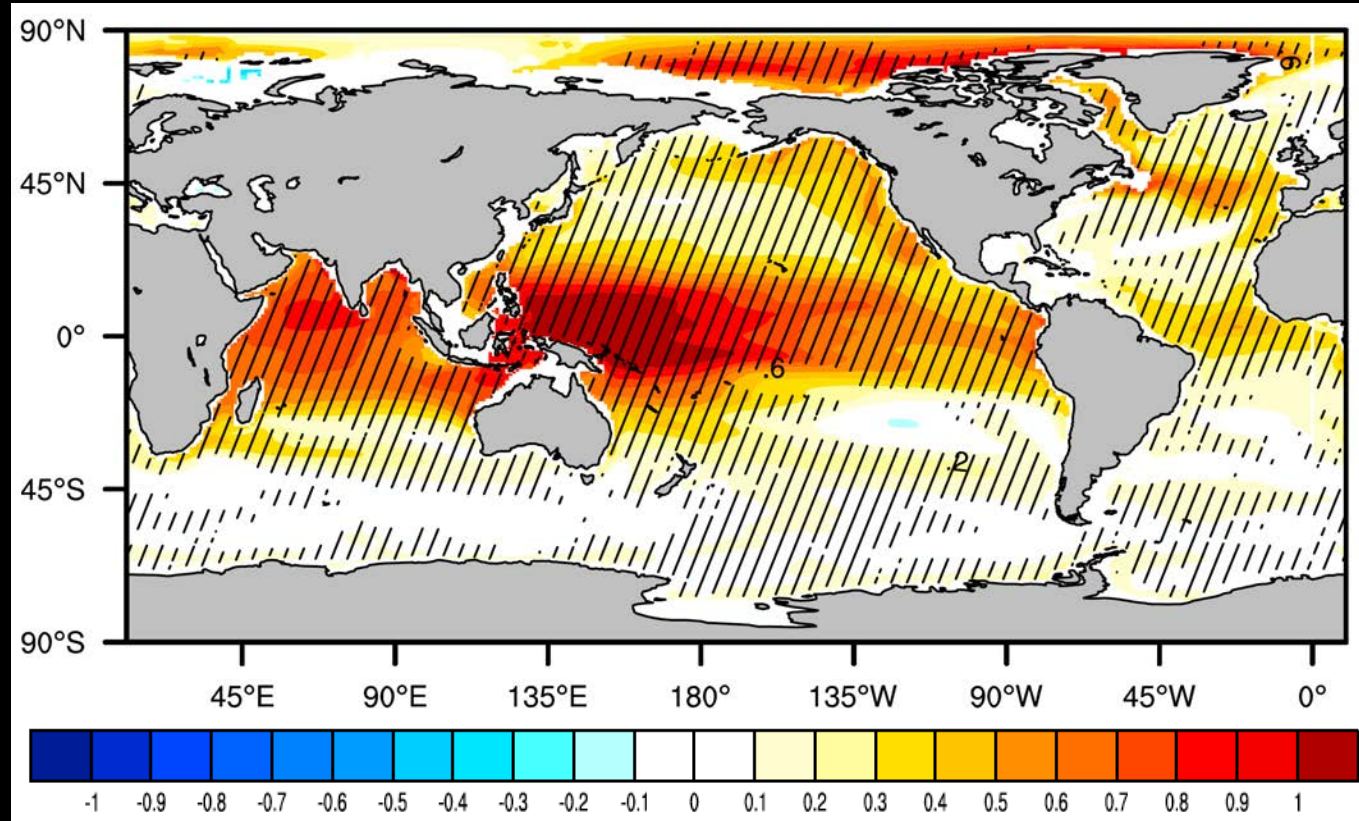


Durack and Wijffels (2010, Journal of Climate)

Temperatur – Salinitätsdiagramm



Erhöhte Stratifizierung und reduzierte Ventilation in einem wärmeren Ozean



Capotondi et al. (2012, Journal of Climate)

Sauerstoffmangel bedroht marine Organismen

Krebstiere

Crustacea

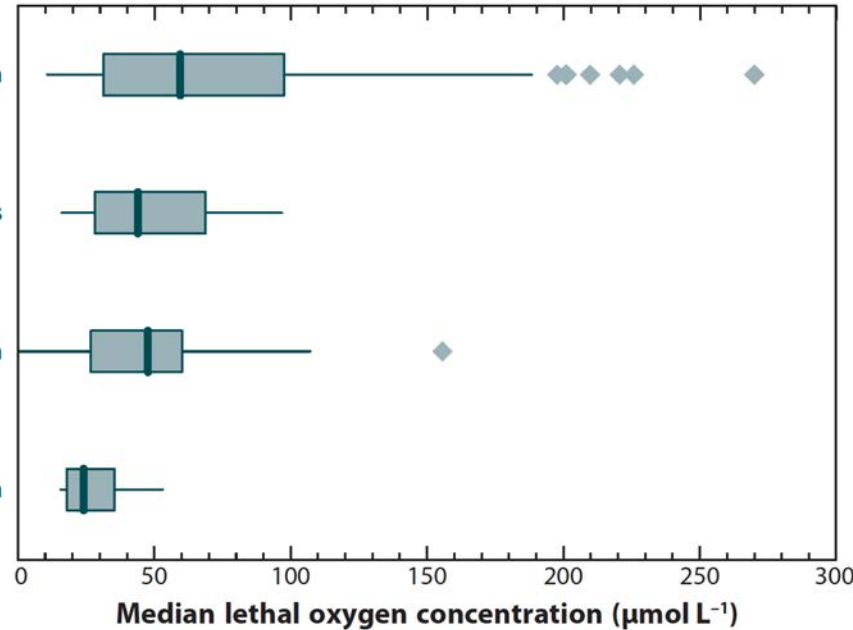
Fishes

Muscheln

Bivalva

Schnecken

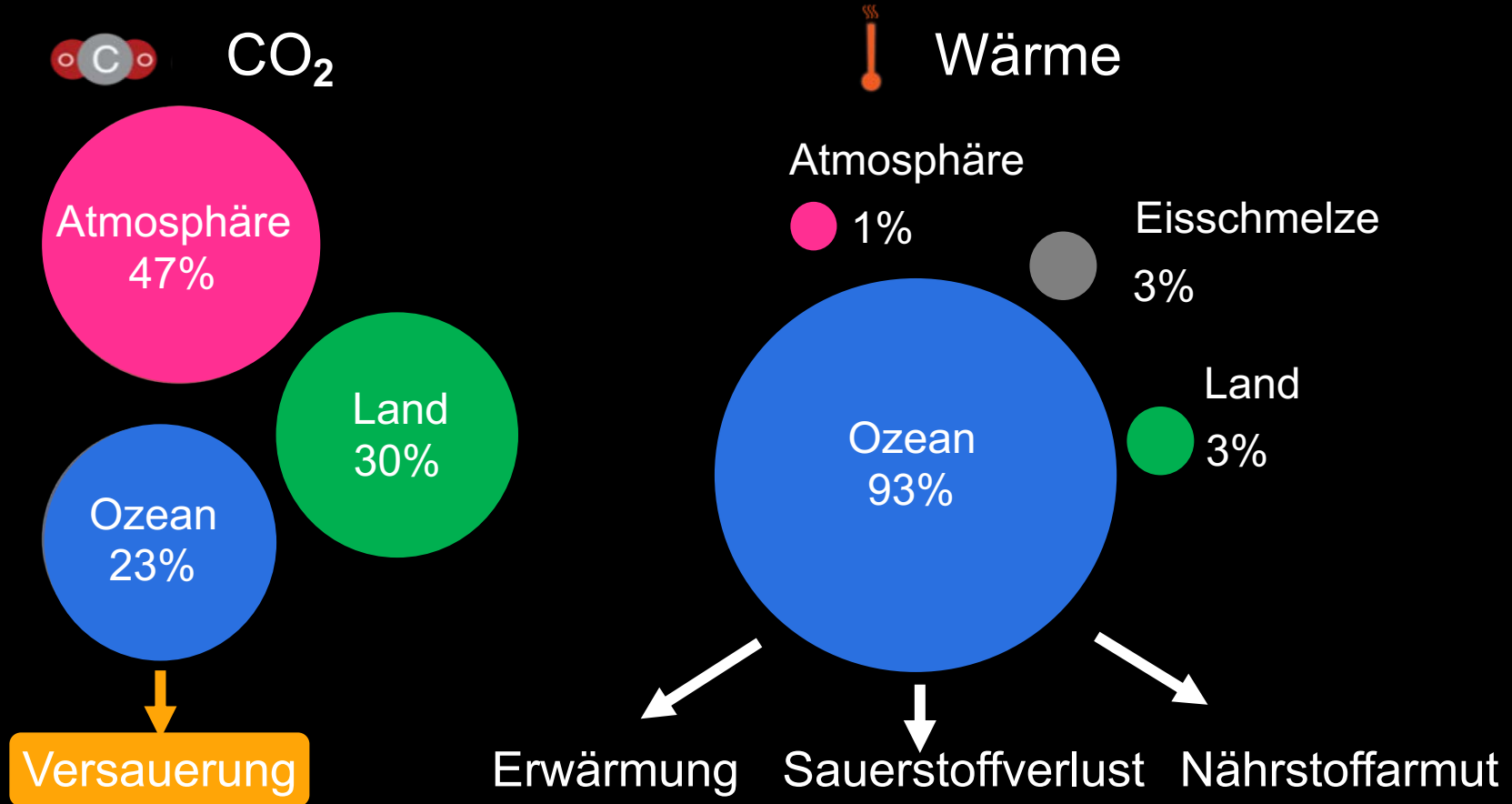
Gastropoda



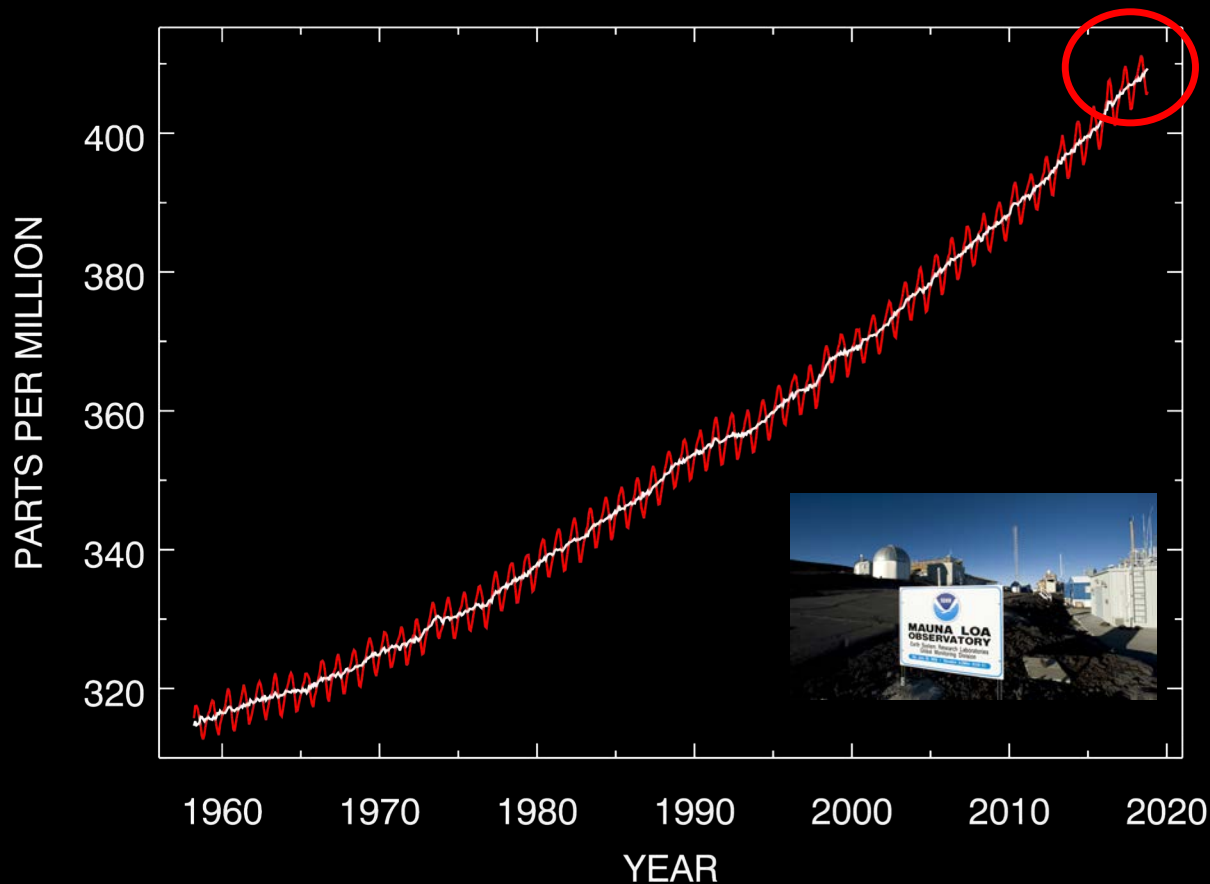
Keeling et al. (2010, Annual Review of Marine Science)

- Fällt der Sauerstoff unter bestimmte niedrige Schwellenwerte, werden Organismen verdrängt
- Sauerstoffmangel führt zu Veränderungen in biogeochemischen Reaktionen im Ozean

Der Ozean verlangsamt die Erwärmung, aber...

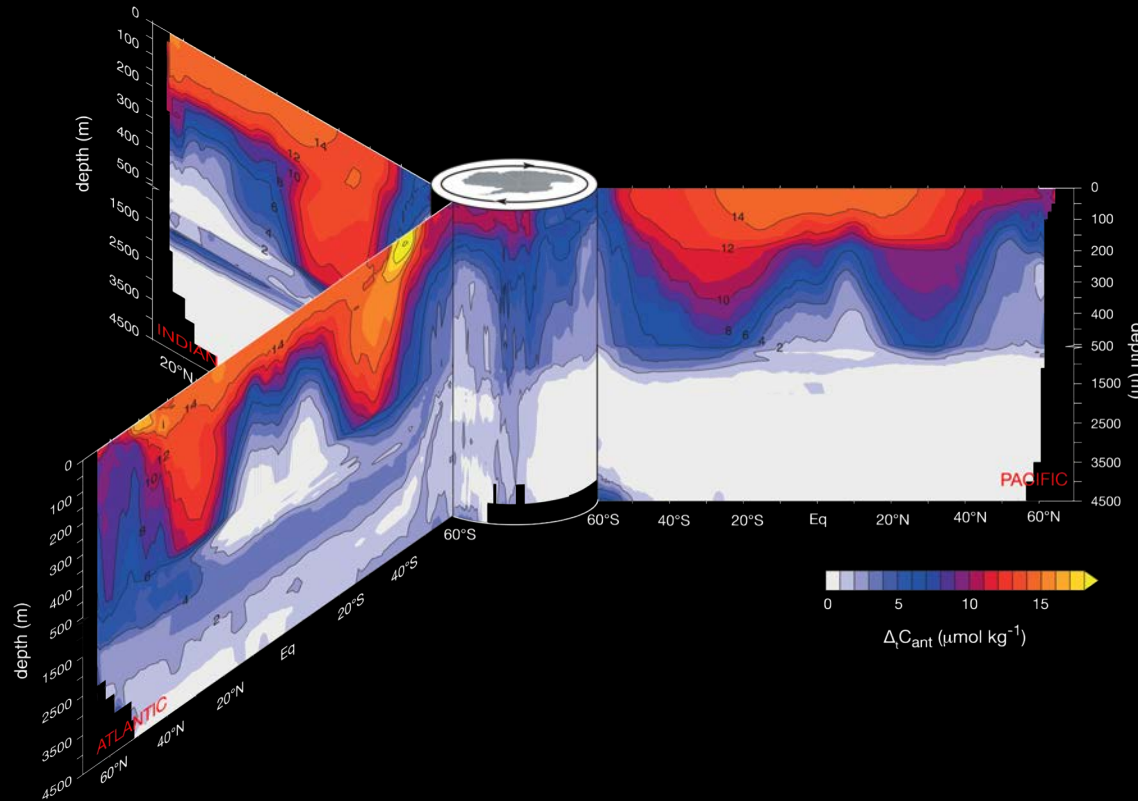


Die atmosphärische CO₂ Konzentration steigt an



Heute: 412 ppm

Anthropogenes CO₂ im Ozean

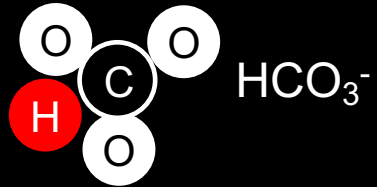
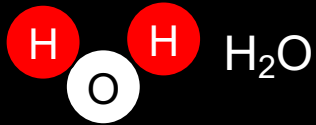


- Der Ozean nimmt 20-30% der anthropogenen CO₂ Emissionen auf
- Kumulierte Aufnahme von anthropogenen CO₂ 1750-2016: 160 GtC $\pm$ 20 GtC
- Führt zu einer Reduktion von 83 ppm in der atmosphärischen CO₂ Konzentration

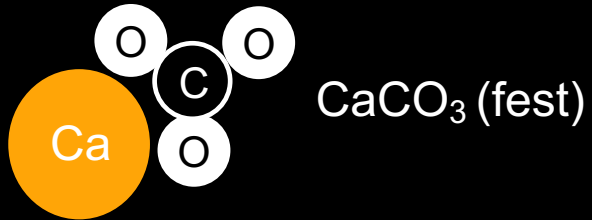
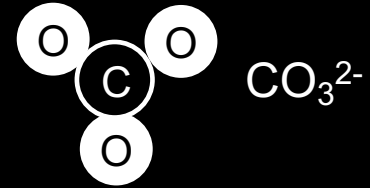
Exkurs 3: Karbonatchemie

Karbonatchemie

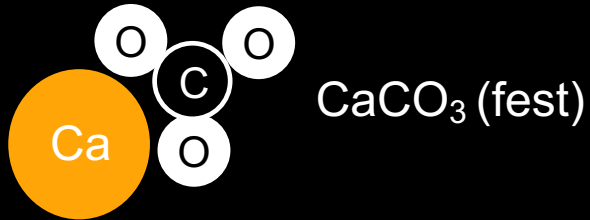
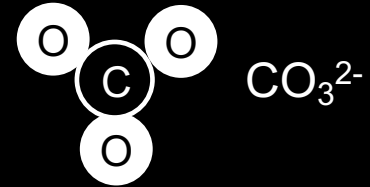
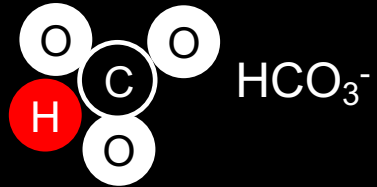
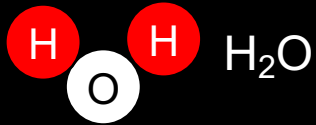
Bicarbonationen (90%)

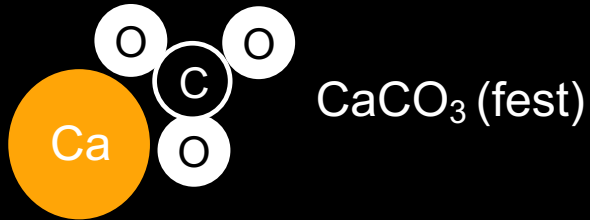
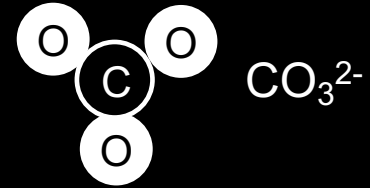
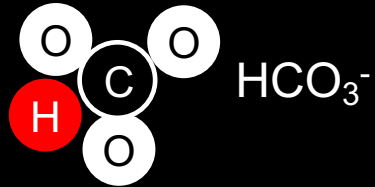
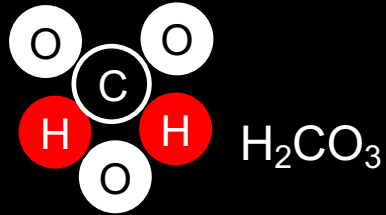


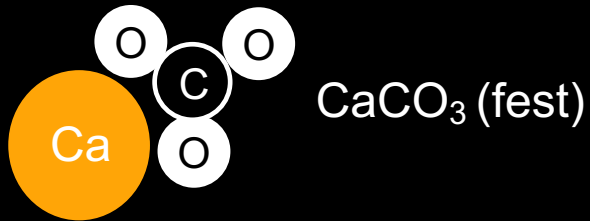
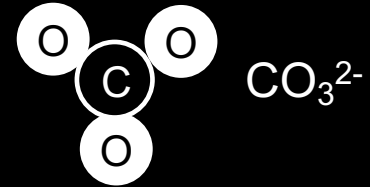
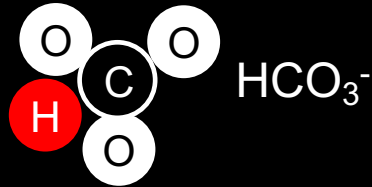
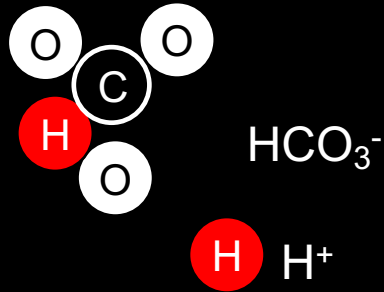
Carbonationen (9%)

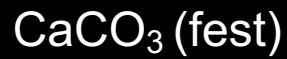
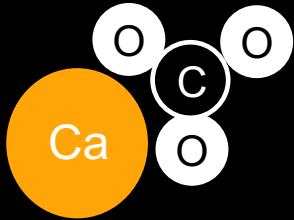
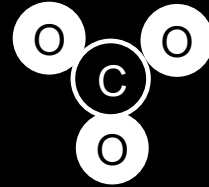
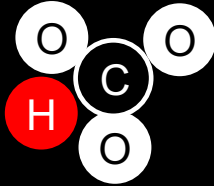
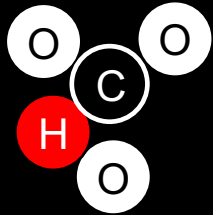
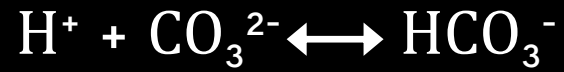


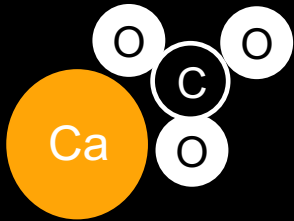
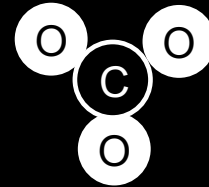
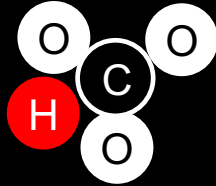
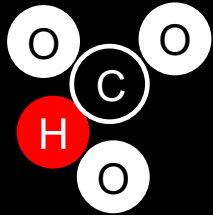
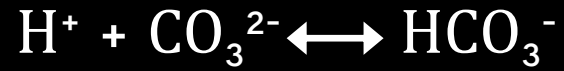
Zugabe von CO_2

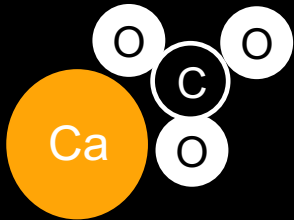
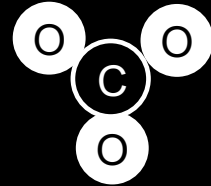
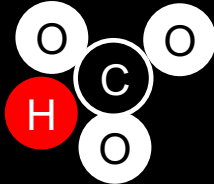
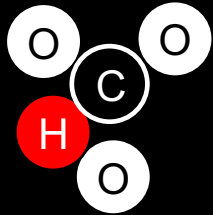
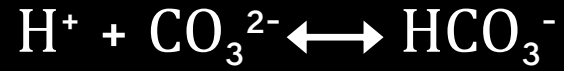


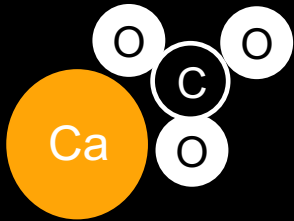
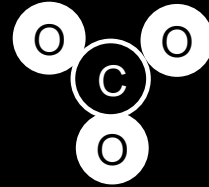
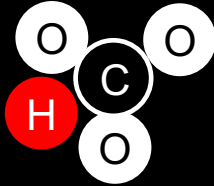
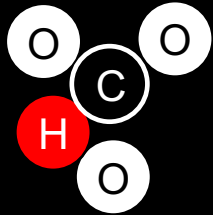
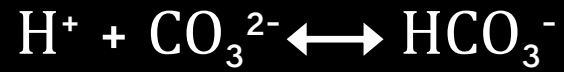


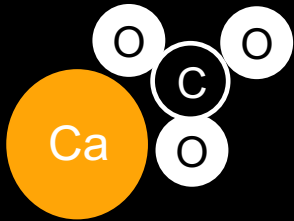
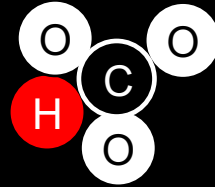
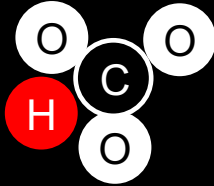
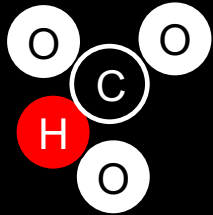
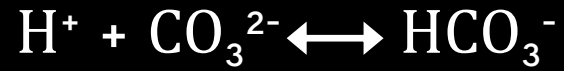




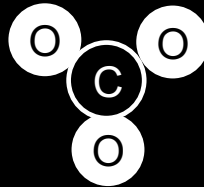
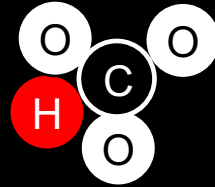
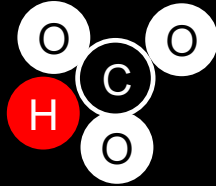
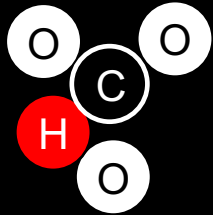
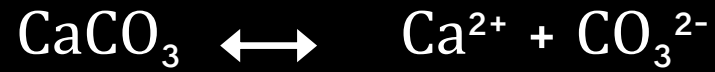




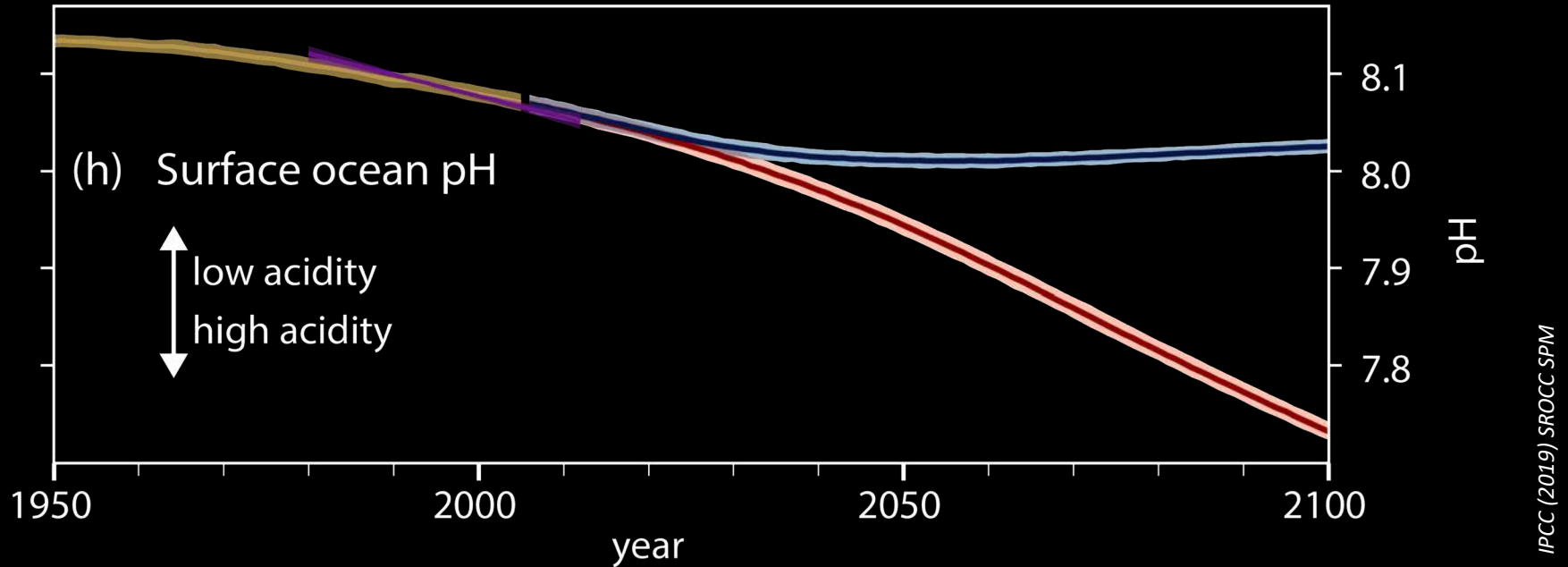




Karbonatchemie



Der Ozean wird saurer



- Seit 1750 hat der pH um 0.1 abgenommen (26% Zunahme in H^+ Konzentration)
- **Der pH nimmt weiter um 0.3 Einheiten abnehmen bis ins Jahr 2100 (RCP8.5)**

Ozeanversauerung: Auswirkung auf kalkbildende Organismen

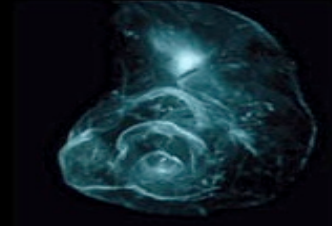


pH = 8.1
Today's surface ocean pH



100
μm

pH = 7.8
Future surface ocean pH

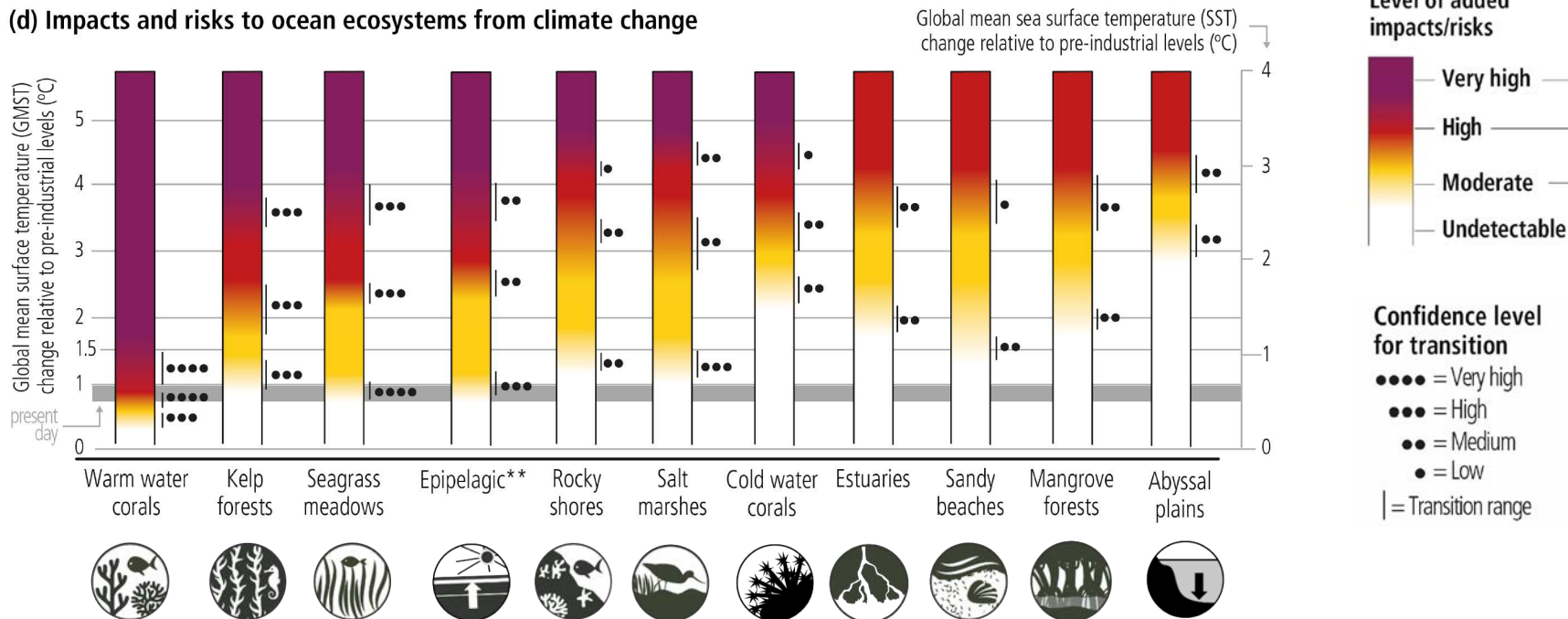


Der Ozean wird im Laufe des 21. Jahrhunderts einen Übergang zu noch nie dagewesenen Bedingungen vollziehen, mit **erhöhten Temperaturen** (*praktisch sicher*), **stärkerer Schichtung** im oberen Ozean (*sehr wahrscheinlich*), weiterer **Versauerung** (*praktisch sicher*), sowie **Sauerstoffrückgang** (*mittleres Vertrauen*)

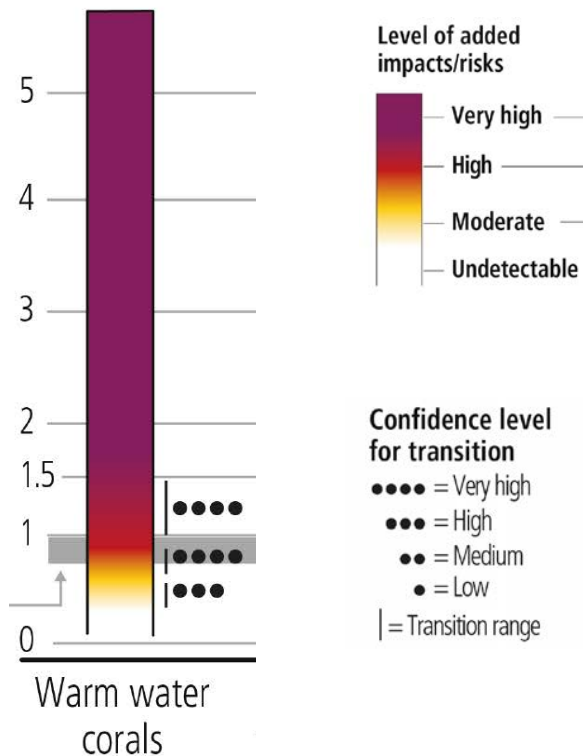
1. Der Ozean im Klimasystem
oder welche Bedeutung spielen die Ozeane im Klimasystem?
2. Der Ozean unter Stress
oder wie wirkt sich der Klimawandel auf die Weltmeere aus?
3. Klimawandel und marine Ökosysteme
oder was bedeuten diese Änderungen für marine Lebewesen?

Fast alle Organismen und Ökosysteme im Ozean sind unter zusätzlicher Erwärmung grossen Risiken ausgesetzt

(d) Impacts and risks to ocean ecosystems from climate change



Sehr hohes Risiko für Warmwasserkorallen bereits bei <1.5°C Erwärmung



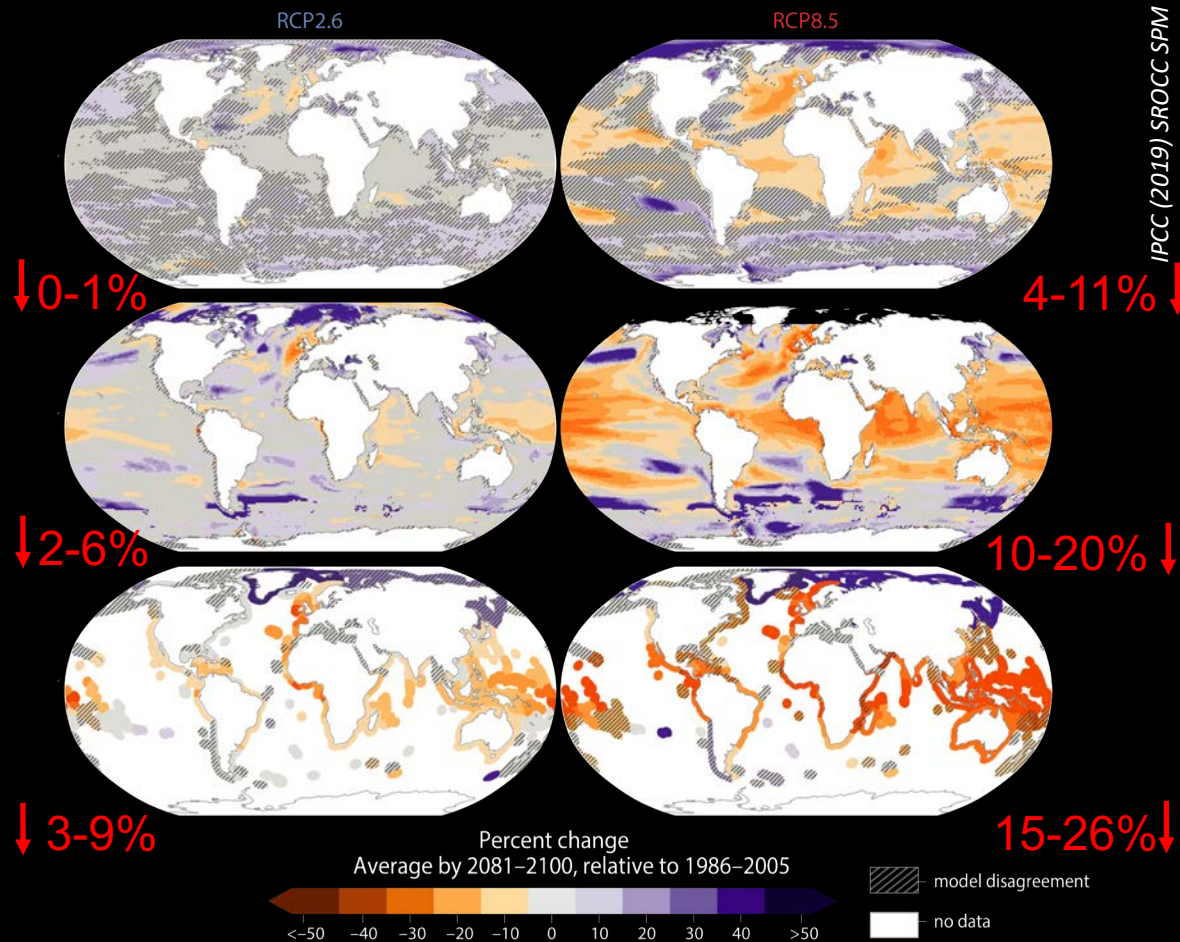
Zukünftige Änderungen und Risiken für marine Ökosysteme

Netto Primärproduktion

Gesamte tierische Biomasse

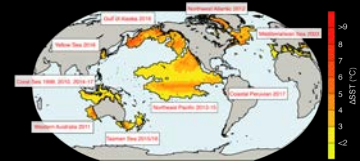
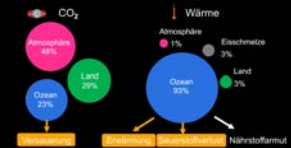
Biomasse von Tieren in der oberen Hälfte der Nahrungskette

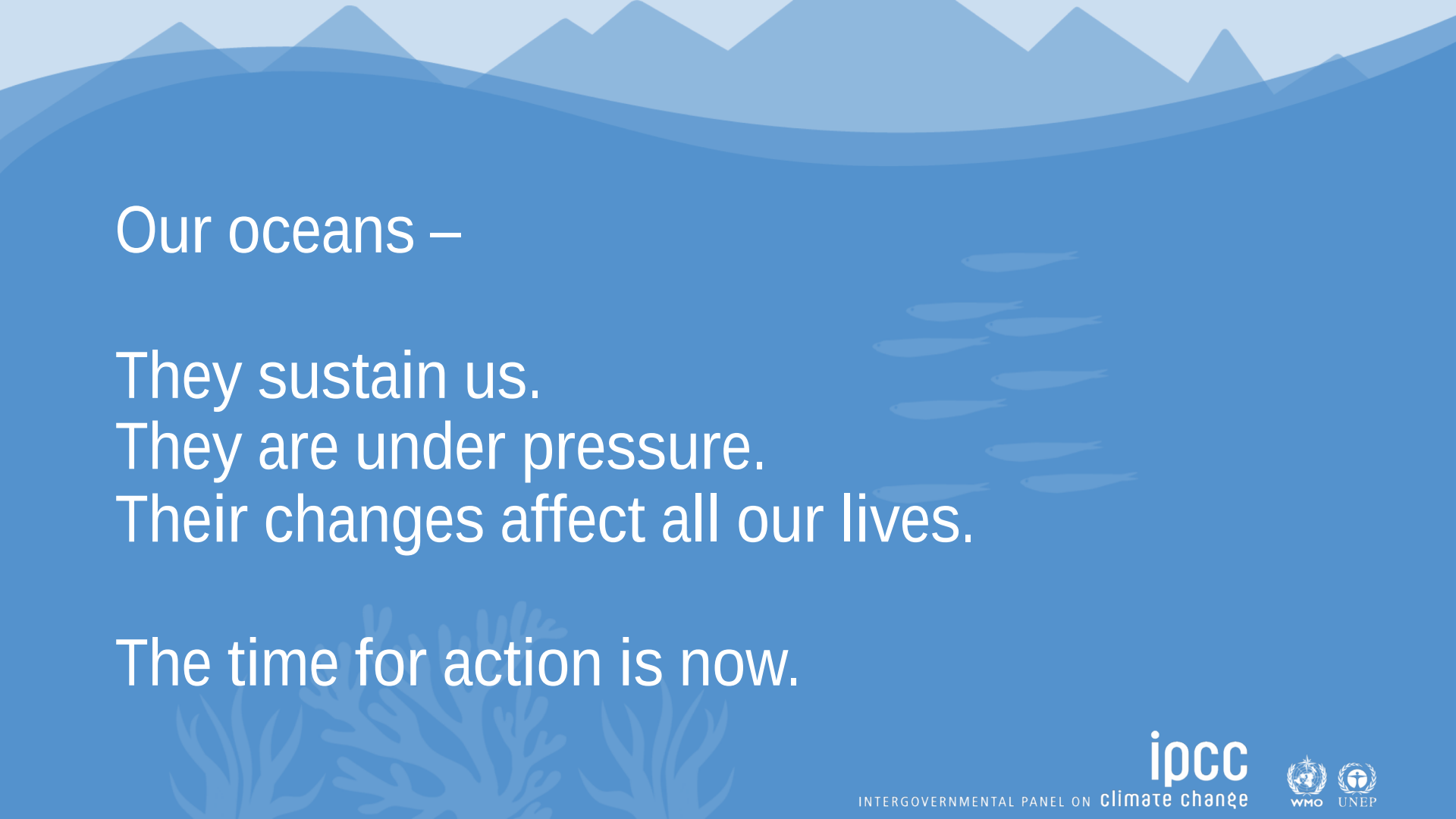
Maximales Fangpotenzial von Fischen



Zusammenfassung

- Die vergangenen CO₂ Emissionen haben den Ozean bereits verändert und die Auswirkungen werden in Zukunft zunehmen: **Wärmer, saurer, weniger Sauerstoff**
- Meeresspiegel:** Der Anstieg beschleunigt sich. Hochwasserereignisse werden stark zunehmen. Der zukünftige Anstieg ist grösser als bisher angenommen. Langfristige Projektionen haben grosse Unsicherheiten.
- Extremereignisse:** marine Hitzewellen werden häufiger und stärker auftreten
- Marine Ökosysteme:** tierische Biomasse könnte um 20% und Fischfang um 25% abnehmen (Szenario ohne Klimaschutz). Fast alle Warmwasserkorallen werden bei 2°C Erwärmung aussterben





Our oceans –

They sustain us.

They are under pressure.

Their changes affect all our lives.

The time for action is now.