



Klimawandel – ein Phänomen unserer Zeit?

Prof. Ulrike Feistel

01.07.2019



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext

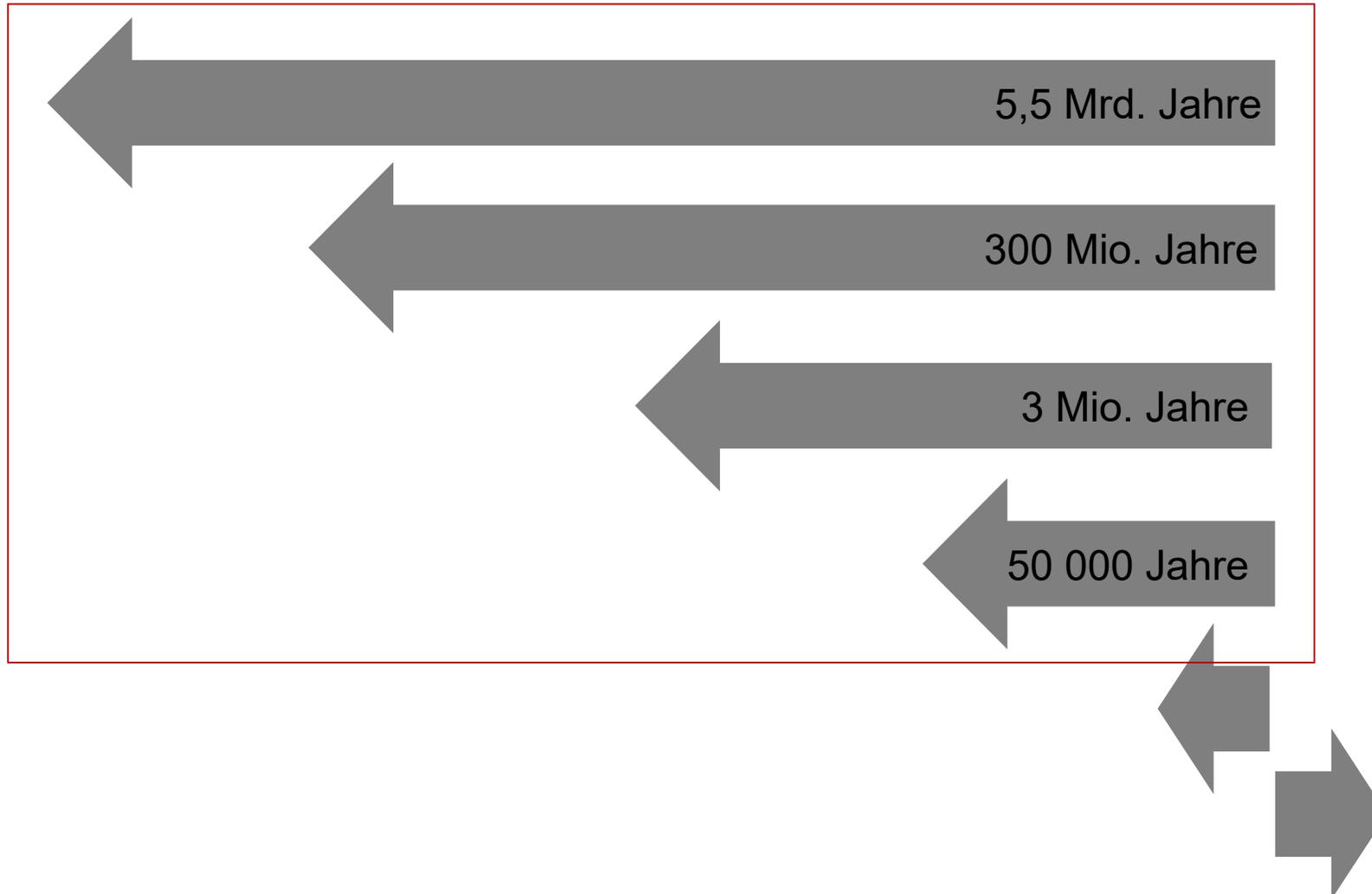


Überblick

Entstehung der Erde

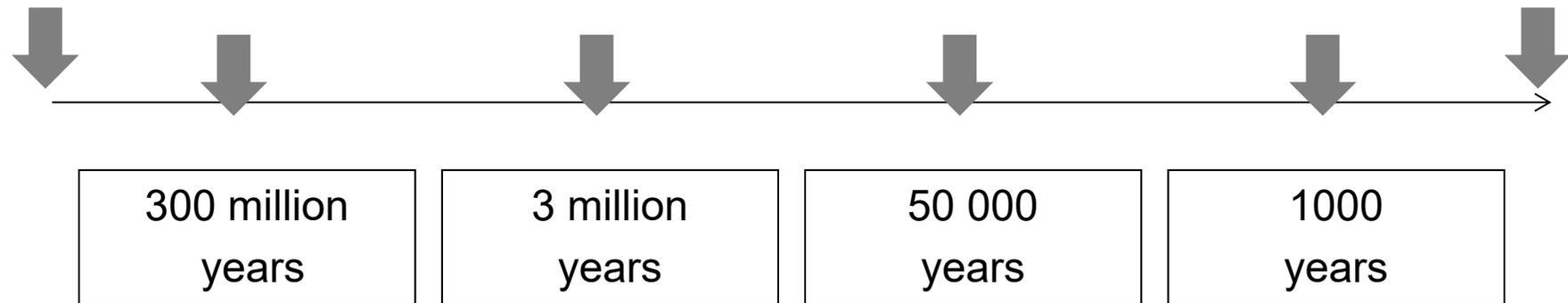
heute

Zukunft





Überblick



Wie änderte sich das Erdklima in der Vergangenheit?

Ordnen sich die aktuellen Veränderungen in die natürliche Klimavariabilität ein?



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



CO₂ und das Erdklima



- Aktuelle CO₂-Konzentration der Atmosphäre:
413.01 ppm - 29. Juni 2019 (Quelle: www.co2.earth)

= 0,02% der Atmosphäre (Ruddiman, 2014)



CO₂ und das Erdklima

- Das *faint young sun* Paradoxon

Seit der Entstehung laufen im Sonneninneren nukleare Reaktionen ab (Bildung von Helium, $H \rightarrow He$)

Allmähliche Expansion und Erhöhung der Strahlkraft

Sonne war 25 % bis 30% schwächer (Ruddiman, 2014)

Die Erde müsste lange Zeit komplett gefroren gewesen sein
Das Klima müsste sich extrem erwärmt haben



CO₂ und das Erdklima

- Das *faint young sun* Paradoxon

Hinweise dass die Erde nicht komplett gefroren war

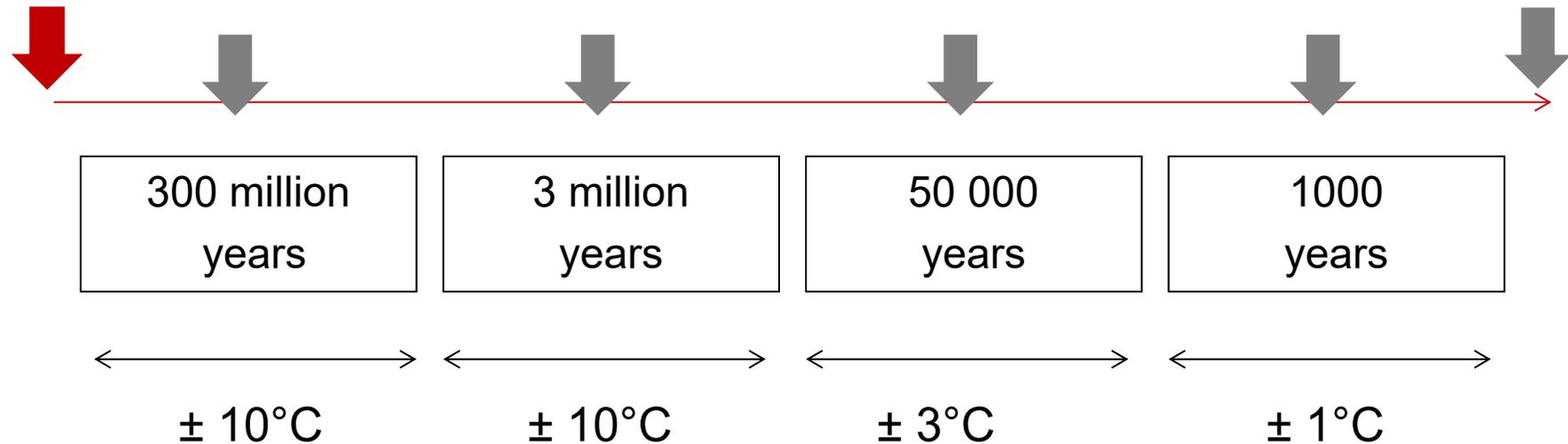
Überwiegend durch Wasser transportiertes und abgelagertes Sedimentgestein

Leben auf der Erde während der letzten 3,5 Milliarden Jahre

Die Erde ist bewohnbar geblieben, die Temperaturen sind nicht drastisch gestiegen



CO₂ und das Erdklima

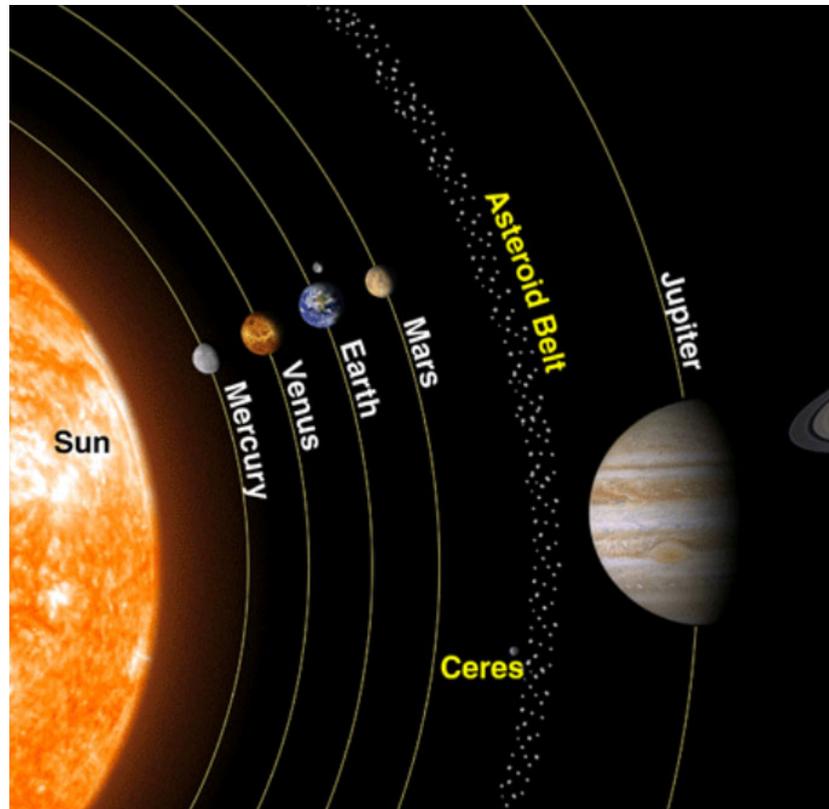


- Mittlere Oberflächentemperatur der Erde: 15°C
- Nur relativ geringe Temperaturschwankungen
- Regulierung der Temperatur auf ein mehr oder weniger konstantes Niveau?



CO₂ und das Erdklima

- Thermostat? - Vergleich Venus - Erde



Universe today.com

Erde: 15°C

Venus: 460°C

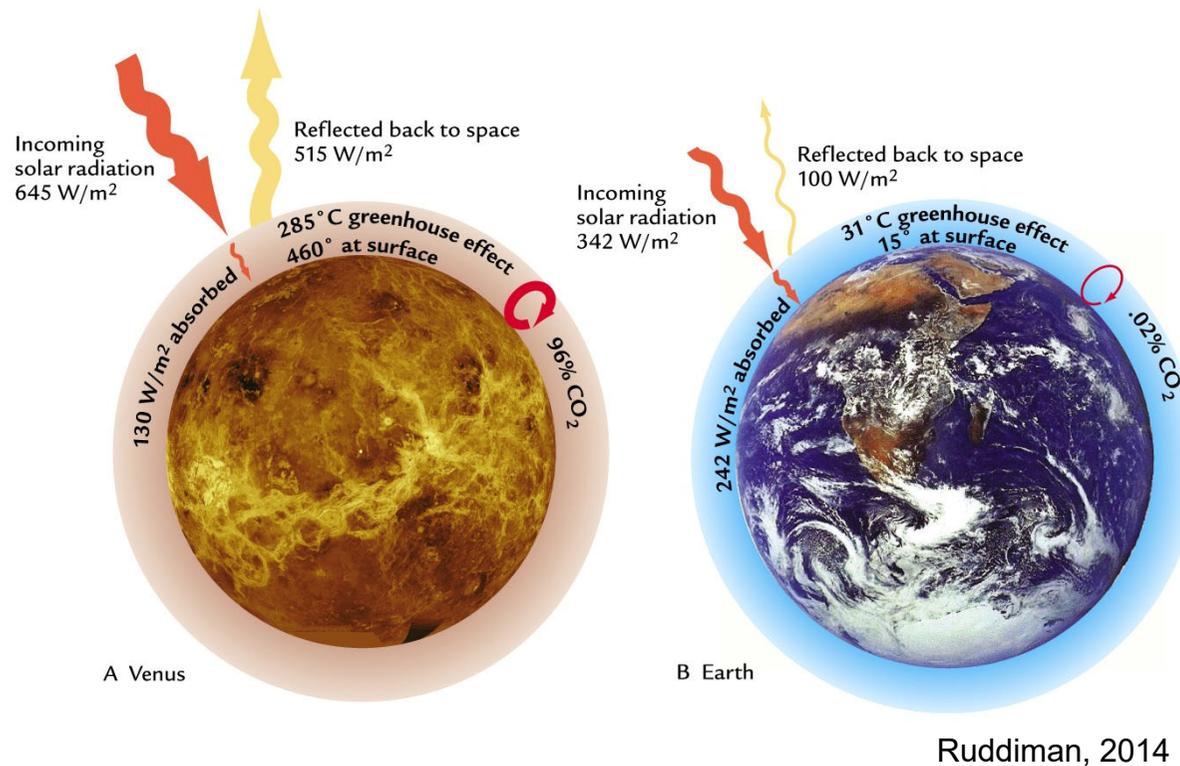
Strahlung umgekehrt
proportional zum Quadrat
der Entfernung

Erde: 340 W/m²

Venus: 645 W/m²

CO₂ und das Erdklima

- Thermostat? - Vergleich Venus - Erde



Erde: 240 W/m²

Venus: 130 W/m²

Warum ist die Venus Oberfläche nicht kälter als die Erdoberfläche?



CO₂ und das Erdklima

- Thermostat? - Vergleich Venus - Erde

	Earth	Venus
Relative Entfernung zur Sonne	1	0.72
Strahlung in W/m ²	340	645
Reflektion in %	26	80
Nettostrahlung in W/m²	240	130
CO₂ in the atmosphere in %	0.02	96
Surface temperature in °C	15	460

(Ruddiman, 2014, bearbeitet)



CO₂ und das Erdklima



- CO₂ spielt eine entscheidende Rolle für das Erdklima

Prozesse?



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Archive

- Sediment (und Inhalt)
- Glaziales Eis
- Pollen
 - Bäume
 - Korallen
 - Historische Aufzeichnungen/Überlieferungen

Sediment - auf dem Meeresgrund

- Nicht älter als 150 Millionen Jahre
- Information aus der Schichtung und **Zusammensetzung**



joidesresolution.org

Glaziales Eis

- Kontinentale Eisfelder - 125 000 Jahre - 800 000 Jahre
- Informationen aus der Schichtung und der Zusammensetzung der Staub- und **Lufteinschlüsse**

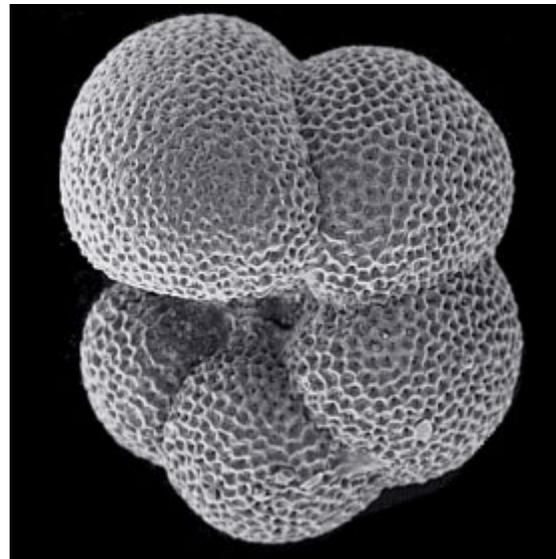
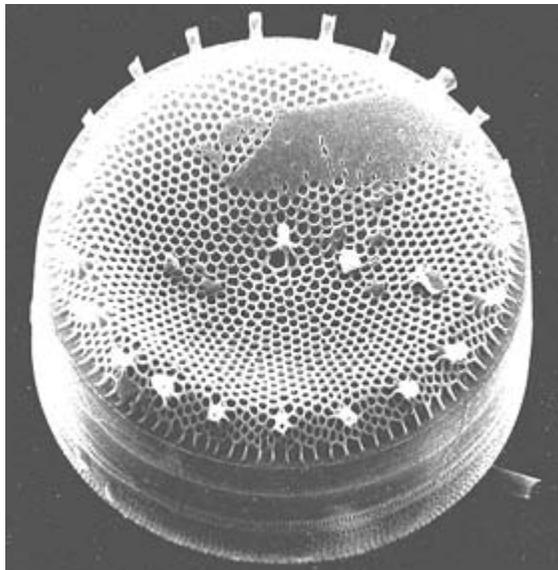


<http://earthobservatory.nasa.gov/>

Sediment - auf dem Meeresgrund

- Information aus der Schichtung und **Zusammensetzung**

Planktonfossilien im Ozeansediment



geology.uprm.edu

**Sauerstoffisotopenverhältnis in den Schalenschichten
gibt Hinweis auf die Verteilung von Eis und Wasser**



Sediment - auf dem Meeresgrund

- Information aus der Schichtung und **Zusammensetzung**

Planktonfossilien im Ozeansediment

Verdunstung: verdunstendes Wasser hat eine höhere Konzentration an leichtem Sauerstoffisotop ^{16}O

→ Anreicherung von schwererem ^{18}O im verbleibendem Ozeanwasser

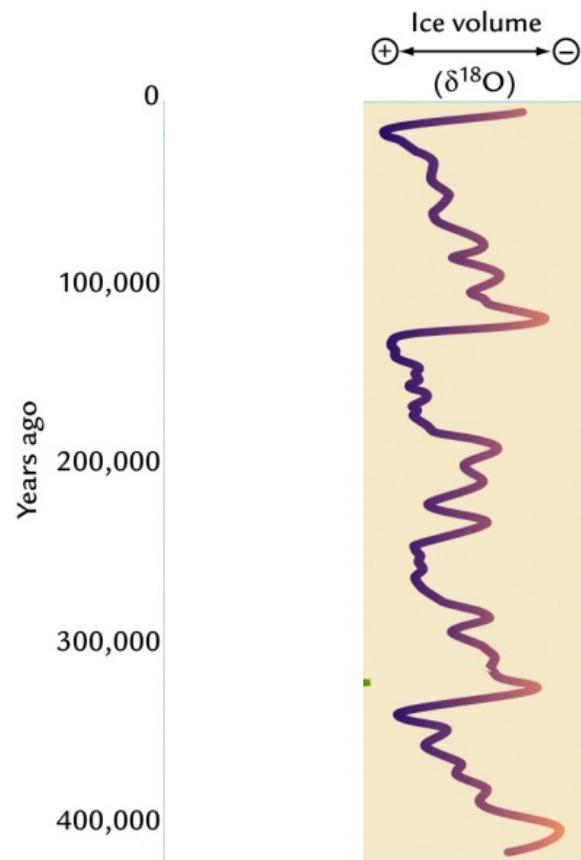
Perioden starker Eisbildung: verdunstetes Wasser als Schnee und Eis gebunden

→ Hohe Konzentration ^{18}O



Sediment - auf dem Meeresgrund

- Sauerstoffisotope in Planktonfossilien lassen Rückschlüsse auf das Eisvolumen zu



Ruddiman, 2014

Natürlicher Schwankungen des Eisvolumens

Ursache: Schwankungen der Temperatur

Muster erkennbar? Ursache?

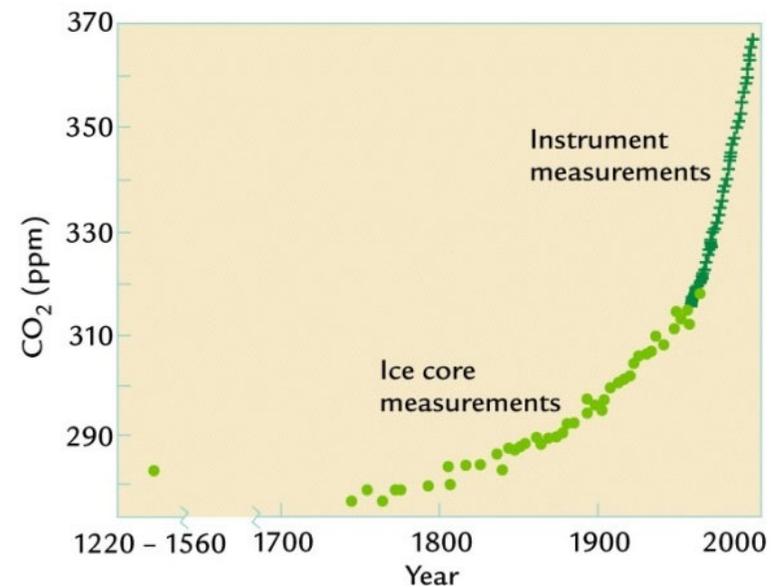
Glaziales Eis

- Informationen aus Zusammensetzung der **Lufteinschlüsse**

Lufteinschlüsse in Eisbohrkernen enthalten CO₂



la Brandt / Norwegian Polar Institute

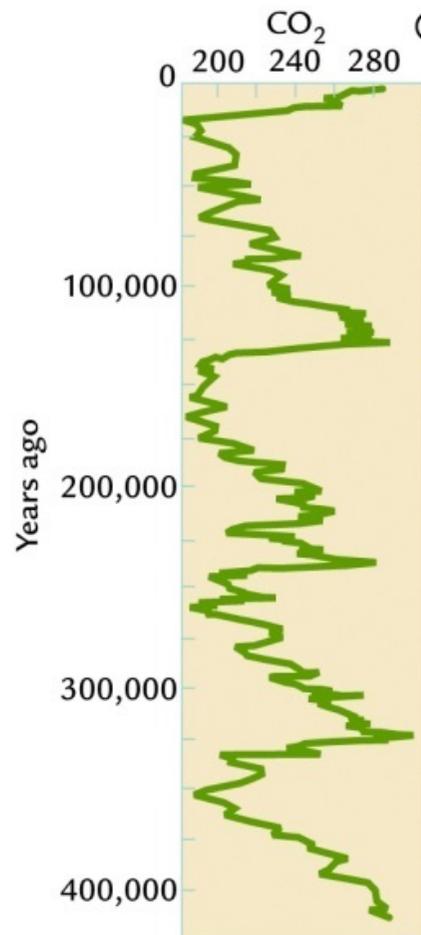


Ruddiman, 2014



Glaziales Eis

- Informationen aus Zusammensetzung der **Lufteinschlüsse**



Ruddiman, 2014

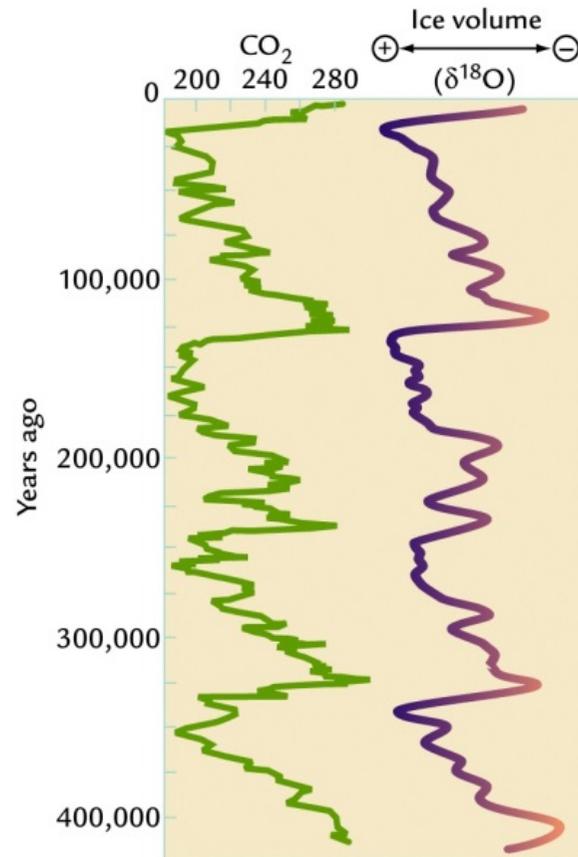
Natürlicher Schwankungen in der
CO₂-Konzentration

Maximum: 300 ppm

Ursache?

Meeressediment & Glaziales Eis

- Sauerstoffisotopen in Planktonfossilien & CO₂-Konzentration in Eisbohrkernen



Natürlicher Zusammenhang zwischen Temperatur und CO₂-Konzentration

Natürliche Konzentrationsschwankungen durch Änderungen des Klimas im Bereich

180 ppm – 300 ppm



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Tektonische Prozesse



Thermostat - CO₂ spielt eine entscheidende Rolle

Prozesse die die CO₂-Konzentration beeinflussen?

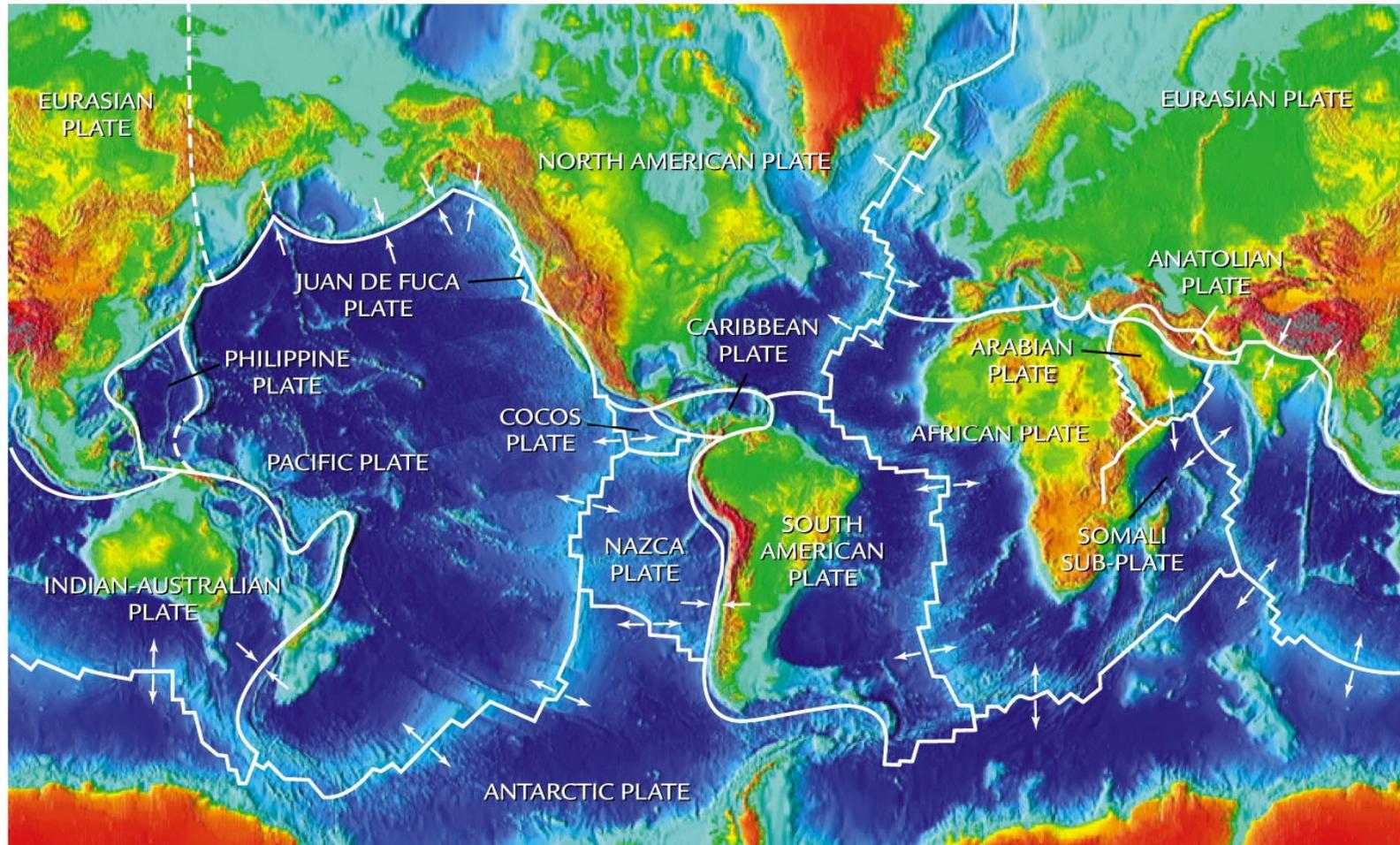
Prozesse die Klimaschwankungen bewirken?

Tektonische Aktivitäten

Chemische Verwitterungsprozesse



Tektonische Prozesse



Ruddiman, 2014



Tektonische Prozesse

- 3 große Kälteperioden/Eiszeiten:

Um 445 Millionen Jahre

325 – 240 Millionen Jahre

35 Millionen Jahre - heute



Tektonische Prozesse

- 3 Hypothesen zur Erklärung der Kälteperioden/Eiszeiten:

Polar position

Spreading rate (BLAG)

Hebungs- und Verwitterungsprozesse



Tektonische Prozesse

- *Spreading rate* Hypothese

Berner et al. 1983, nach den Autoren auch BLAG-Hypothese

„Tektonische Mechanismen kontrollieren das Klima“



Tektonische Prozesse

- *Spreading rate* Hypothese

CO₂-Transfer **in die Atmosphäre** beeinflusst das Klima durch:

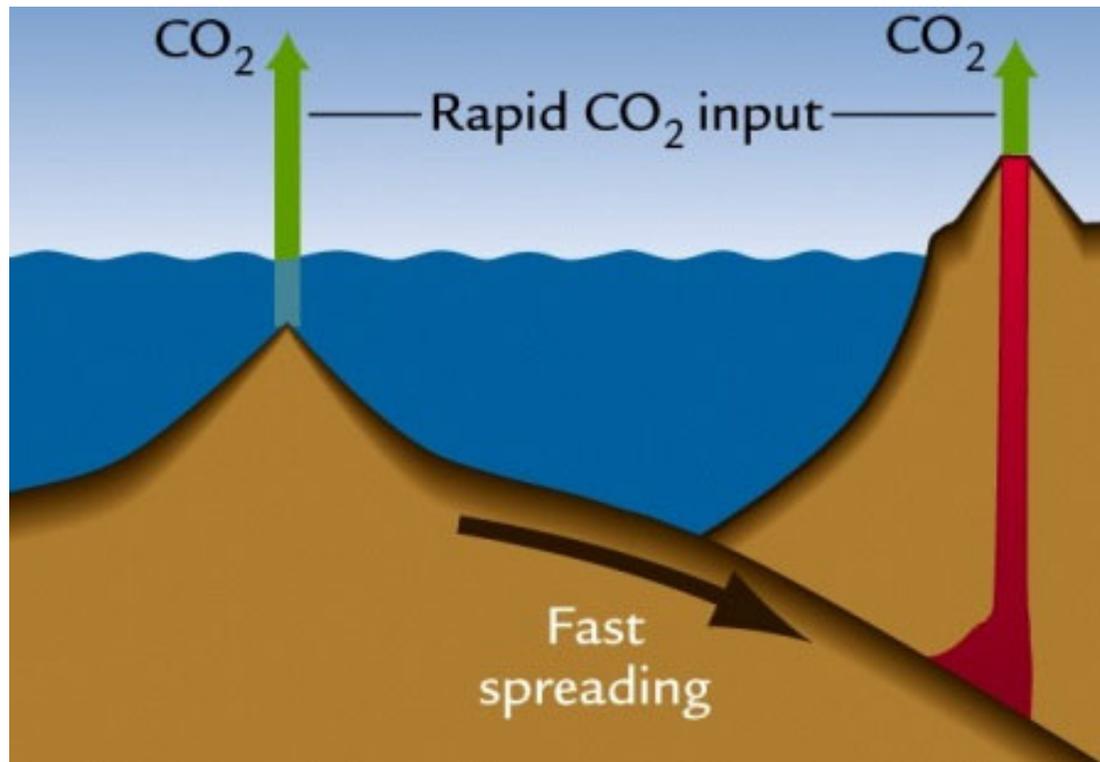
Ausstoß von flüssiger Lava (und CO₂) an den
Ozeanrücken

Ausstoß von flüssiger Lava (und CO₂) an den
Subduktionszonen durch Vulkane



Tektonische Prozesse

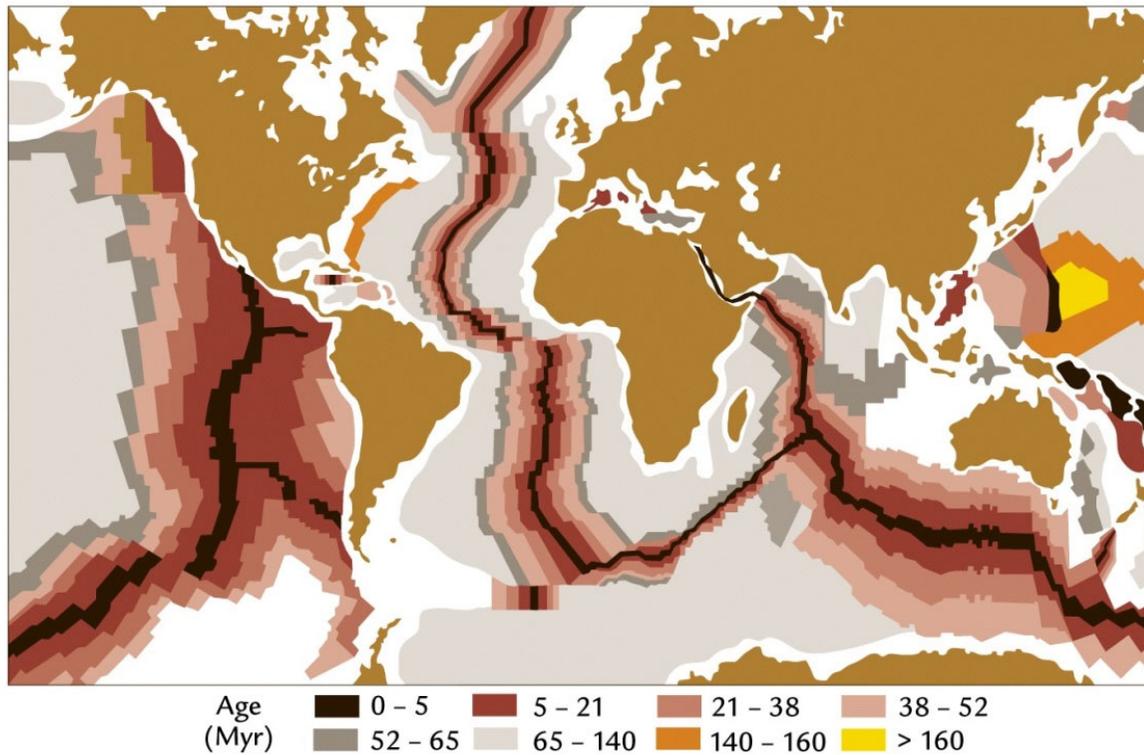
- *Spreading rate* Hypothese



Ruddiman, 2014

Tektonische Prozesse

- *Spreading rate* Hypothese



CO₂-Ausstoß ist variable

Ruddiman, 2014



Tektonische Prozesse

- Hebungs- und Verwitterungsprozesse (**CO₂ aus der Atmosphäre**)

Chemische Verwitterung wird durch folgende Faktoren begünstigt:

Fragmentation von Gesteinsmaterial (große Oberfläche)
Verfügbarkeit von frischem Gestein

In Gebieten wo tektonische Hebungen stattfinden z.B. Gebirge und Gebirgsplateaus findet eine erhöhte chemische Verwitterung statt



Tektonische Prozesse

- Hebungs- und Verwitterungsprozesse (**CO₂ aus der Atmosphäre**)

Chemische Verwitterung wird durch folgende Faktoren begünstigt:

Temperatur

Wasser

Vegetation



Tektonische Prozesse

- Überprüfung der 2 Hypothesen

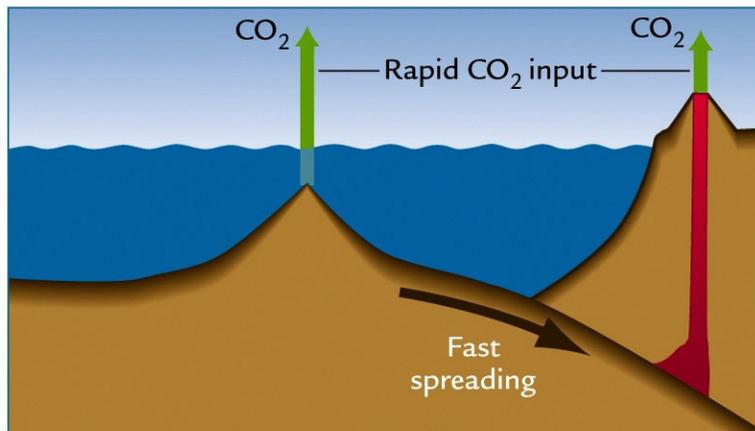
Hebungs- und Verwitterungsprozesse			
Zeit Mio Jahre	Eisfelder vorhanden?	Zusammenstoß von Kontinenten?	Hypothese unterstützt?
325 – 240	Ja	Ja	Ja (wenig CO ₂)
240 - 35	Nein	Nein	Ja (viel CO ₂)
35 - 0	Ja	Ja	Ja (wenig CO ₂)
Spreading rate (BLAG)			
		Spreading?	
100	Nein	Schnell	Ja (viel CO ₂)
0	Ja	Langsam	Ja (wenig CO ₂)

Ruddiman, 2014

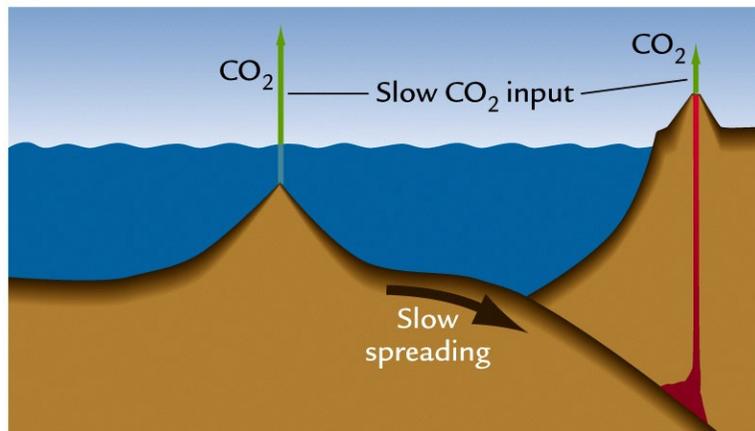


Tektonische Prozesse

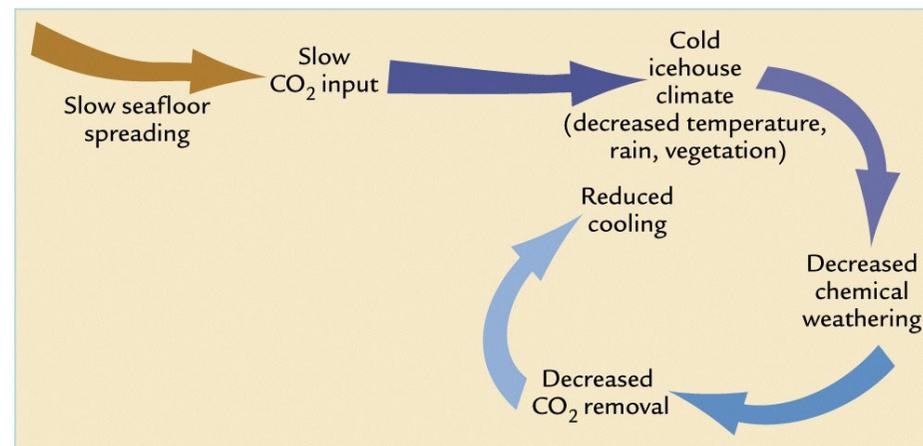
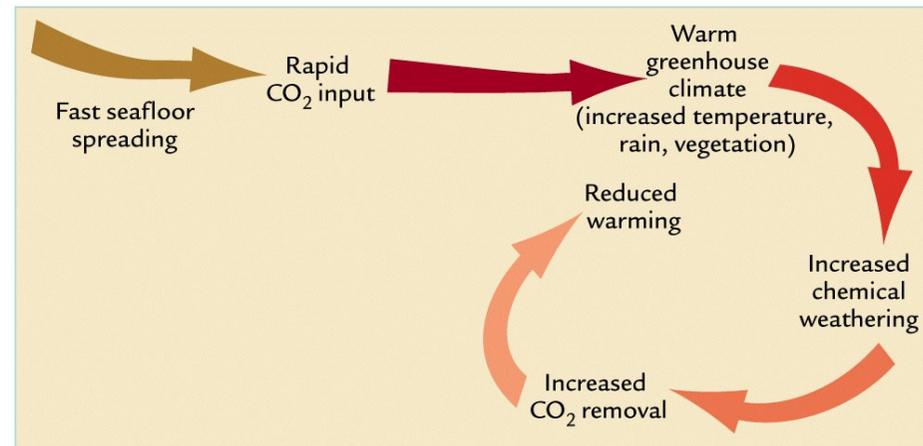
■ Negatives Feedback



A



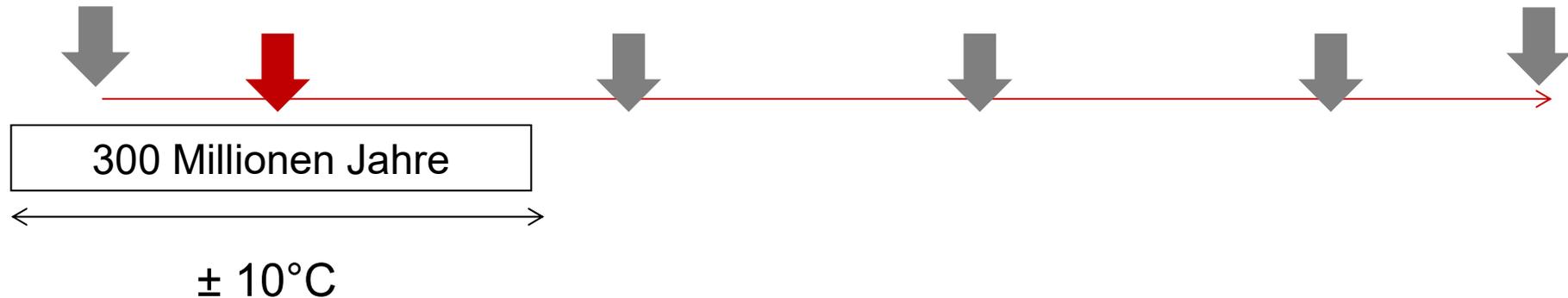
B



Ruddiman, 2014



Tektonische Prozesse



Tektonische Prozesse:

variabler CO_2 -Ausstoß in die Atmosphäre

Chemische Verwitterung Prozesse:

variable CO_2 -Reduzierung

Negatives Feedback spielt eine Rolle und fungiert als
Thermostat



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse**
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Orbitale Prozesse

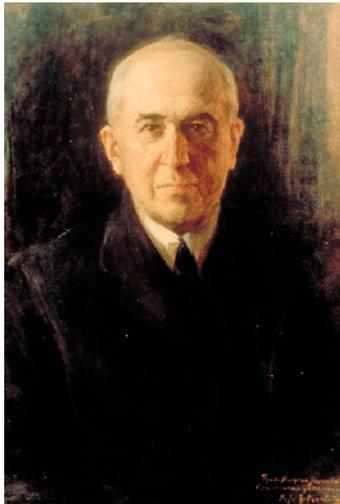


Sonnenstrahlung spielt die entscheidende Rolle für das Klima

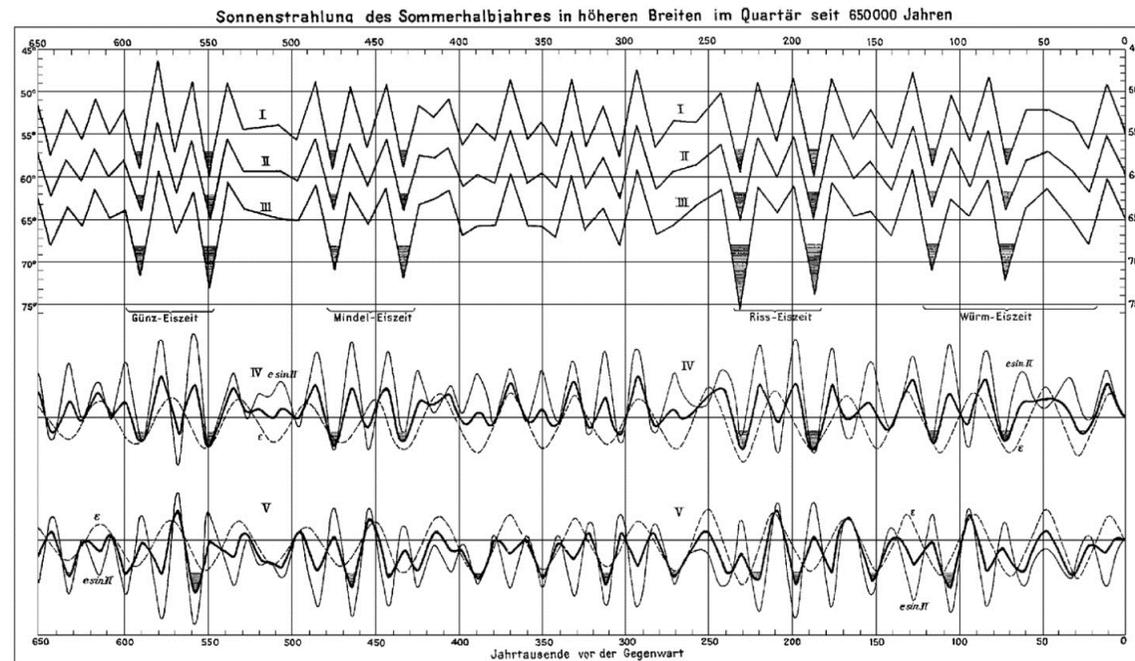
Prozesse die Strahlungsschwankungen bewirken?

Orbitale Prozesse

Milankovich Zyklen (1920)



Milutin Milankovich
(1879-1958)



Änderungen der Neigung der Erdachse

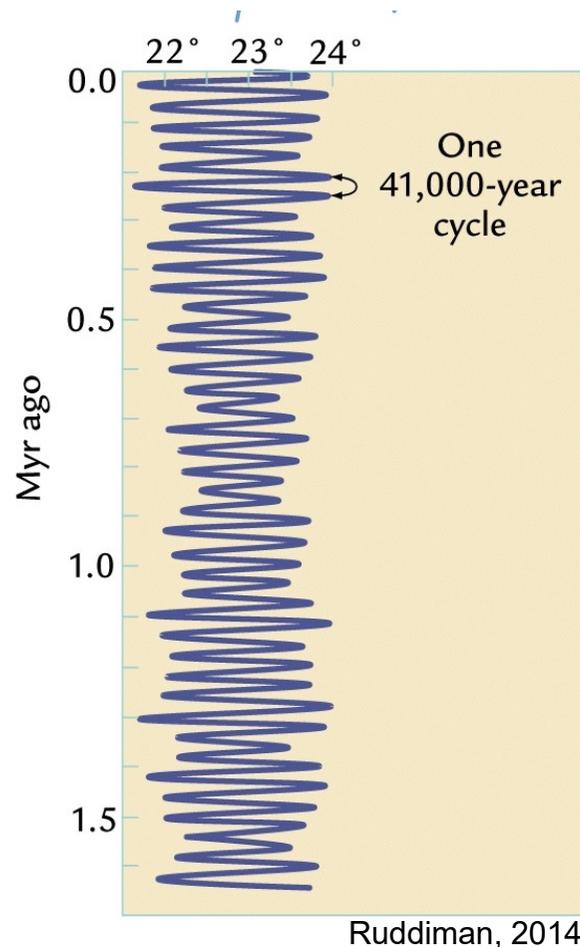
Änderungen der Exzentrizität der Umlaufbahn

Änderungen der Präzession



Orbitale Prozesse

- Neigung der Erdachse – Zyklen von 41 000 Jahren



Bereich: 22.2° - 24.5° , **aktuell: 23.5°**

Geringe Neigung:
Verringerung der jahreszeitlichen
Schwankungen

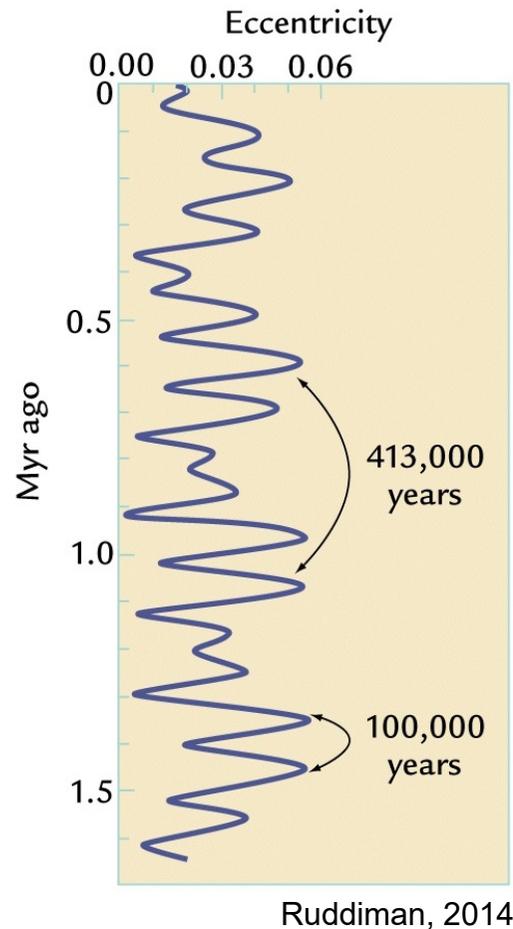
Starke Neigung:
Erhöhung der jahreszeitlichen
Schwankungen

Hohe Breitengrade besonders betroffen



Orbitale Prozesse

- Exzentrizität – Zyklen von 100 000 und 413 000 Jahren



$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{a}$$

Bereich: 0.005-0.0607, **aktuell: 0.0167**

Min: 0.005 kreisähnlich:

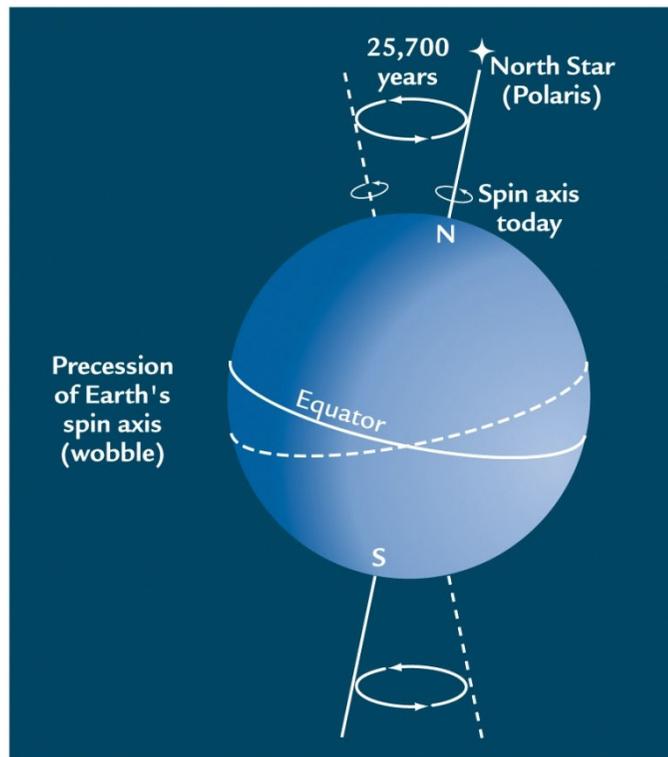
Keine jahreszeitlichen Schwankungen

Max: 0.0607 = ellipsenförmig:

Hohe jahreszeitlichen Schwankungen

Orbitale Prozesse

- Präzession – Zyklus von 25 700 Jahren



Ruddiman, 2014

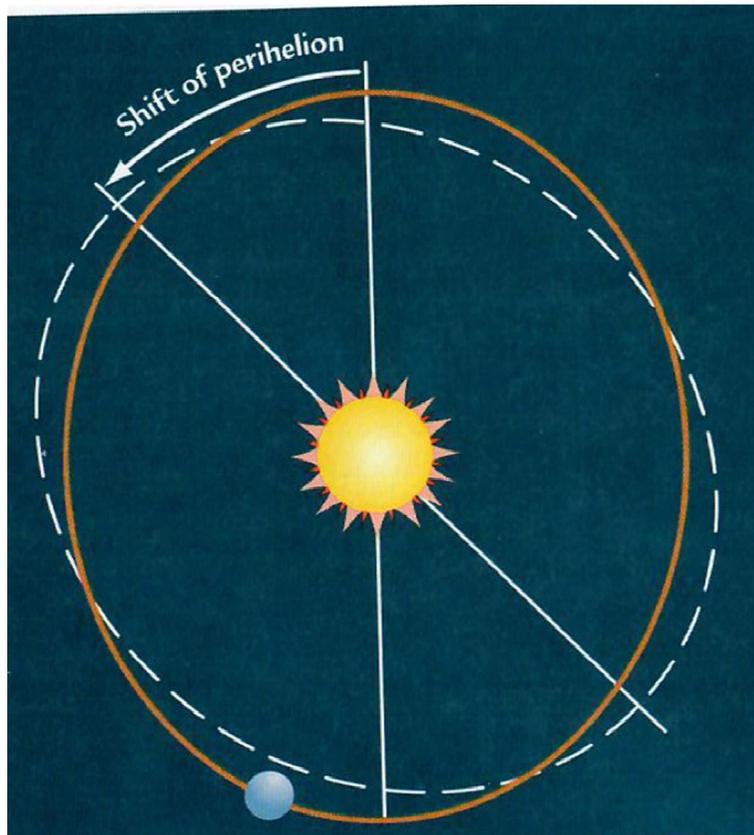
aktuell: **zeigt zum Polarstern**

Änderungen führen zu
Änderungen in der Zeit der
Passage von Perihelium und
Aphelium



Orbitale Prozesse

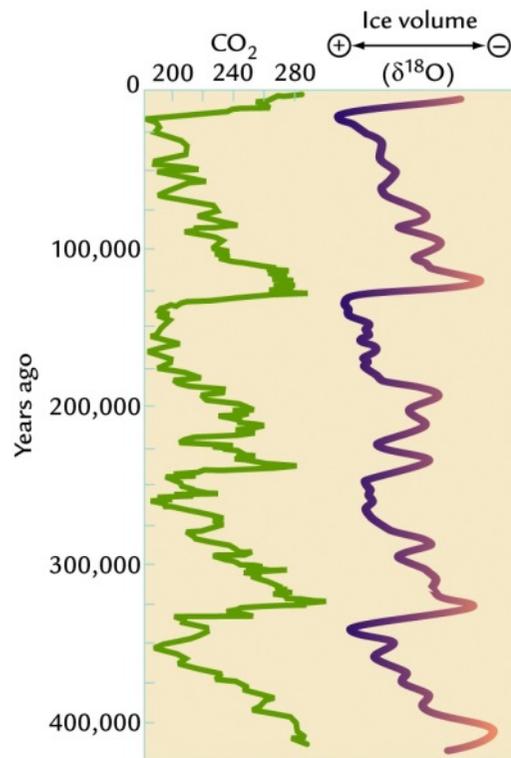
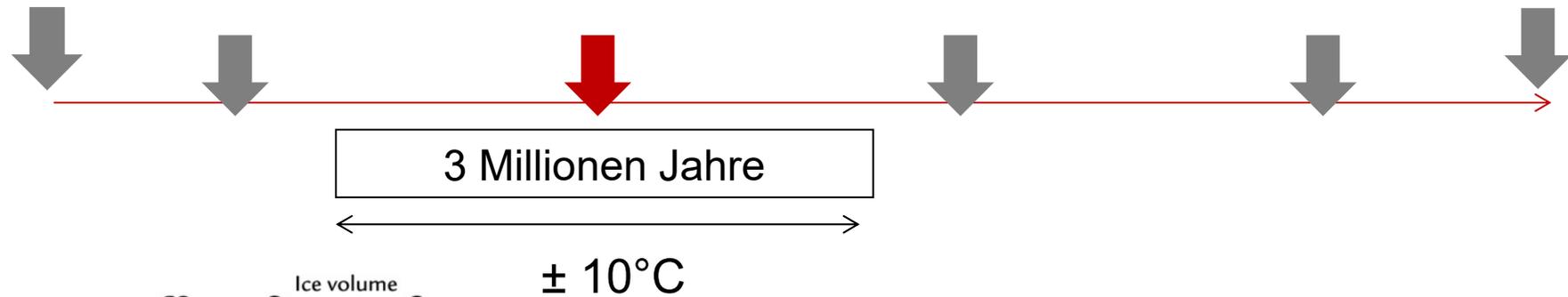
- Präzession der Ellipse



Ruddiman, 2014



Orbitale Prozesse



Langfristige mittlere CO₂-Konzentrationen und Temperatur spiegeln die orbitalen Zyklen der Sonnenstrahlung wieder

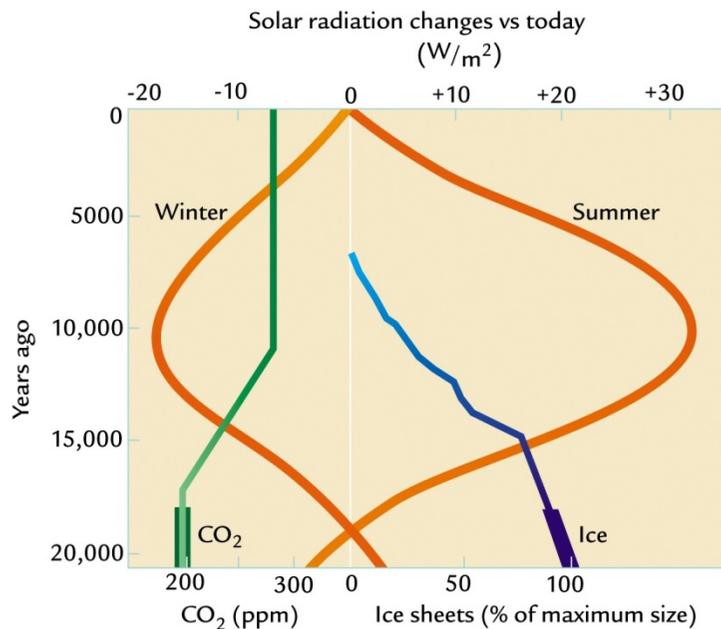
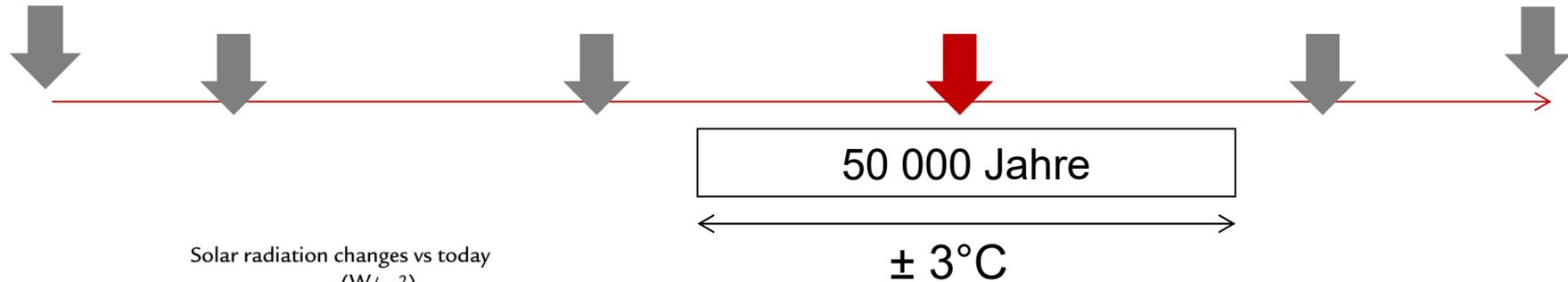


Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse**
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Glaziale Prozesse



Ruddiman, 2014

21 000 Jahre: max. Eisausdehnung
als Folge niedriger Einstrahlung

10 000 Jahre: Strahlungsmaximum
und Eisrückgang

6 000 Jahre: Temperaturrückgang



Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Aktuelle Entwicklungen

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

1990 – AR1 *Scientific Assessment of Climate Change*

Oktober 2018 – *Global Warming of 1.5 Degrees*

August 2019 – *Climate Change and Land*

Confidence: 5 Levels very low bis very high

Likelihood: 9 Levels extremely unlikely (Wahrscheinlichkeit < 1%)

bis

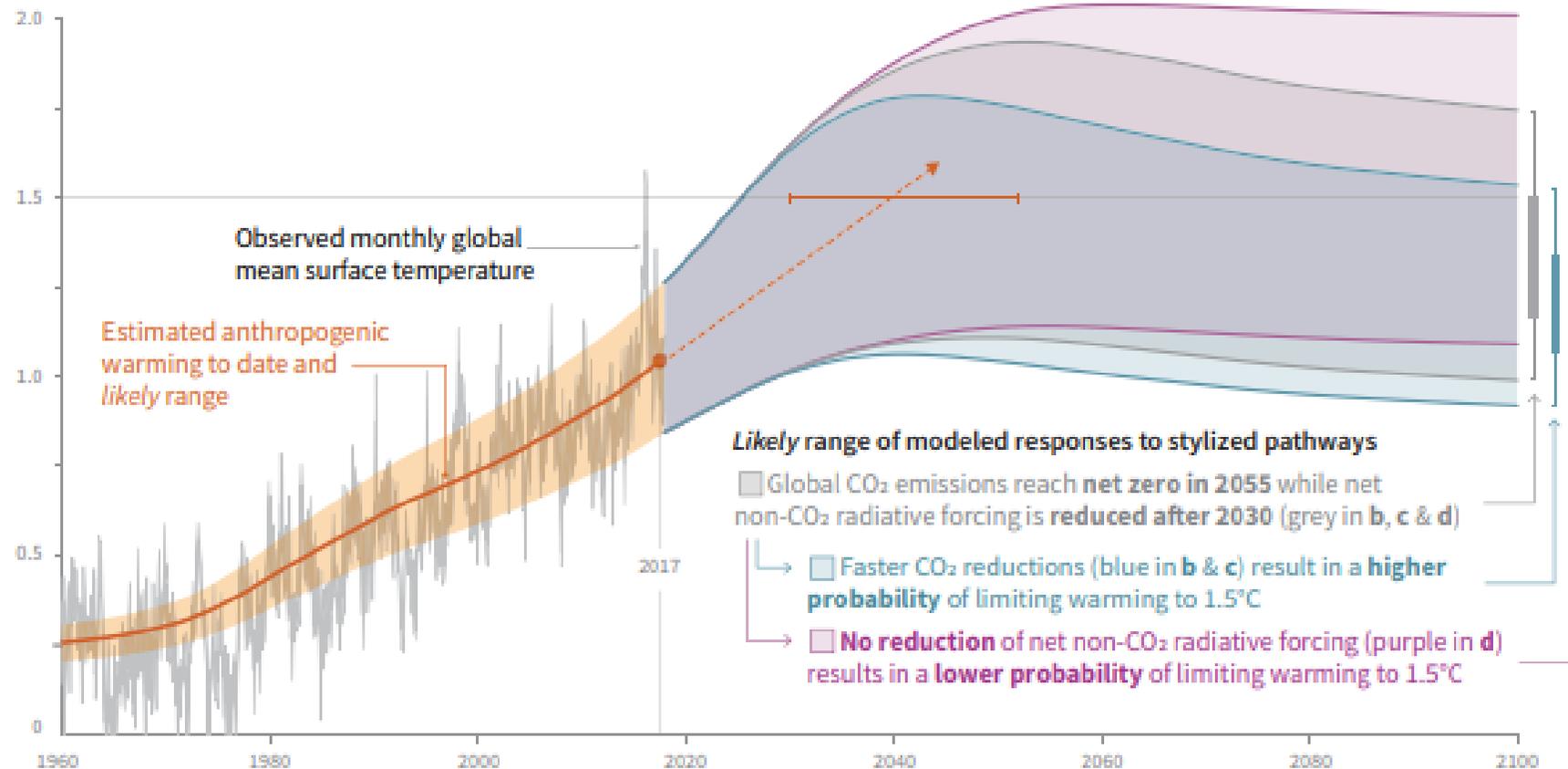
virtually likely (Wahrscheinlichkeit > 99%)



Aktuelle Entwicklungen

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Global warming relative to 1850-1900 (°C)



ICPP, 2018

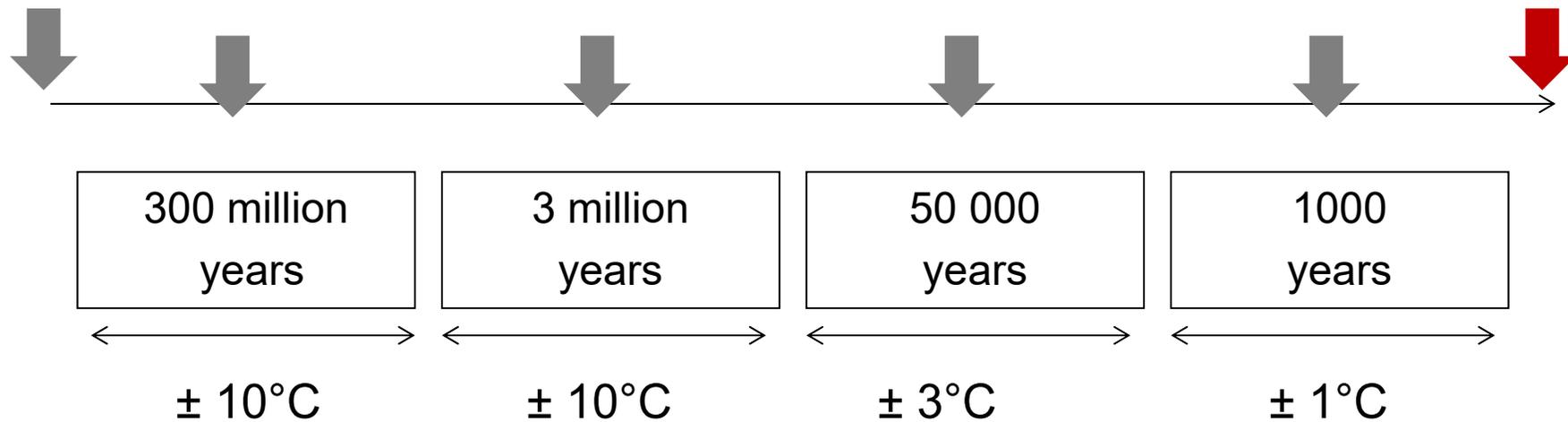


Inhalt

- CO₂ und das Erdklima
- Klimawandel vergangener Zeiträume
 - Klimaarchive
 - Tektonische Prozesse
 - Orbitale Prozesse
 - Glaziale Prozesse
 - Unmittelbare Vergangenheit
- Aktuelle Entwicklungen
- Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext

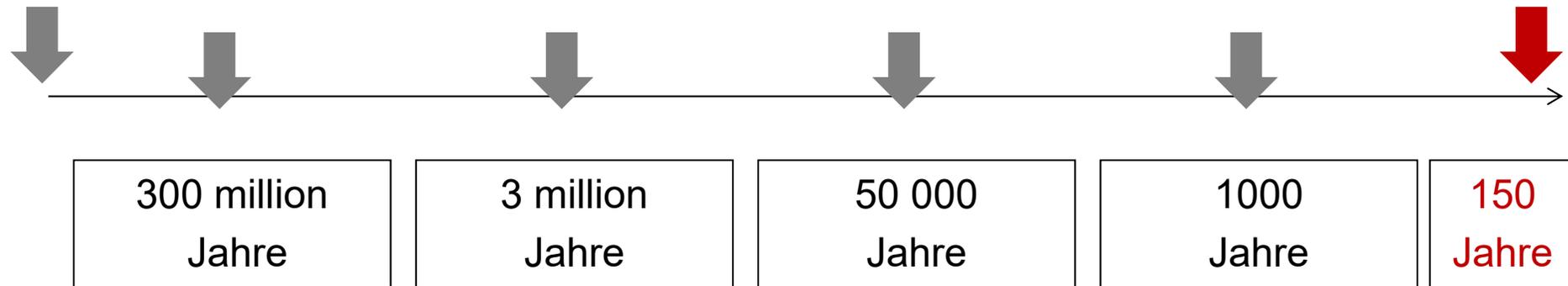


Wie änderte sich das Erdklima in der Vergangenheit?

Ordnen sich die aktuellen Veränderungen in die natürliche Klimavariabilität ein?



Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Natürliche CO₂
Konzentrationschwankungen
im Bereich
200 ppm/Millionen Jahre

Natürliche
Temperaturschwankungen
des Klimas im Bereich
± 10°C/Millionen Jahre



Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



300 million
Jahre

3 million
Jahre

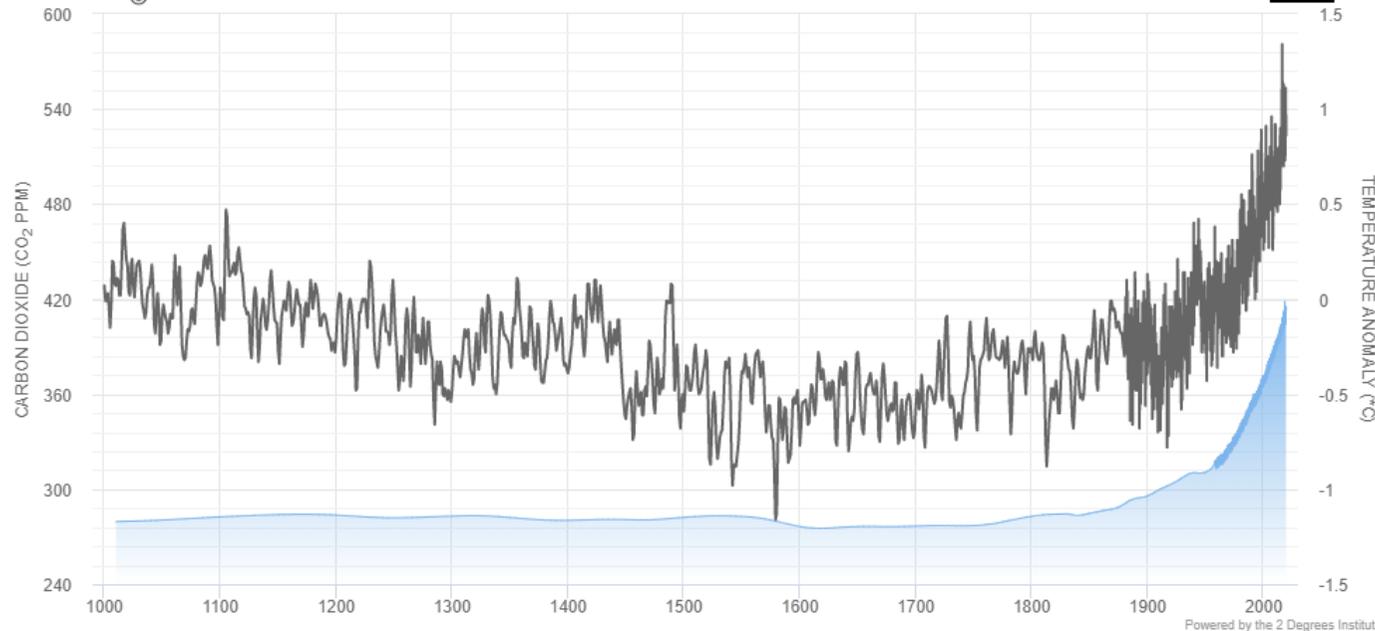
50 000
Jahre

1000
Jahre

150
Jahre

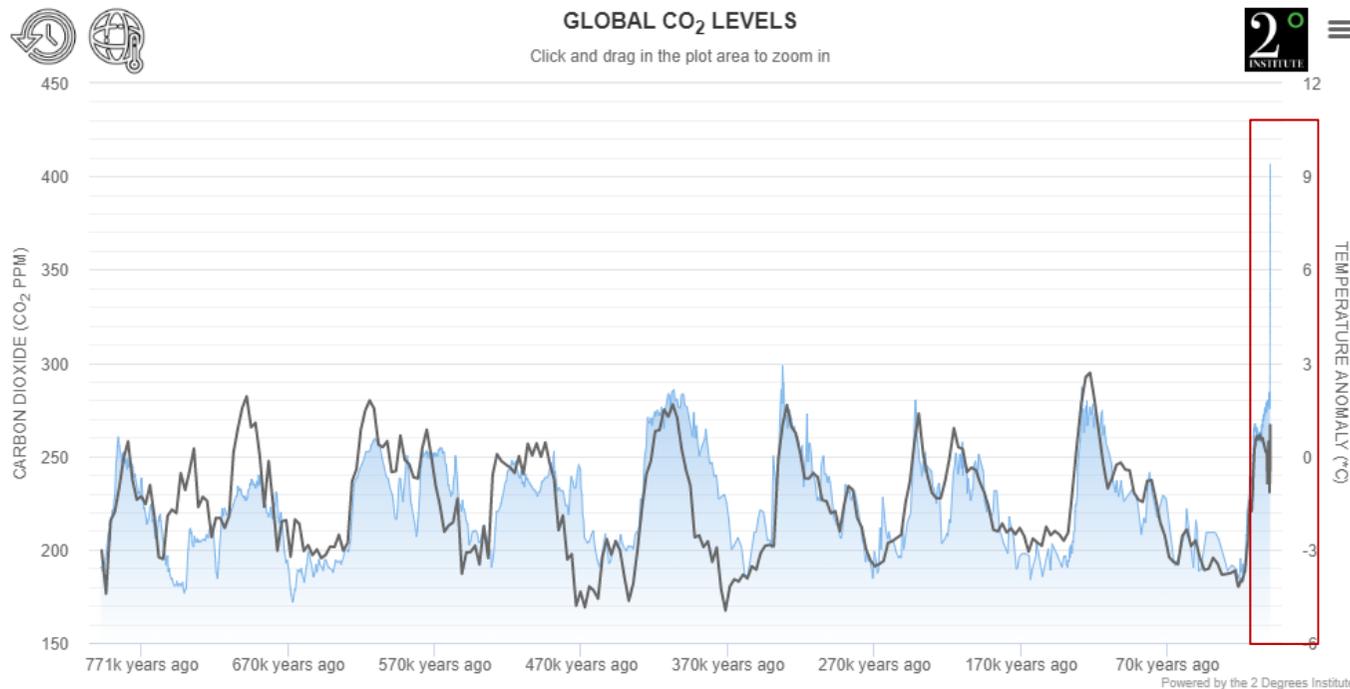


GLOBAL CO₂ LEVELS
Click and drag in the plot area to zoom in



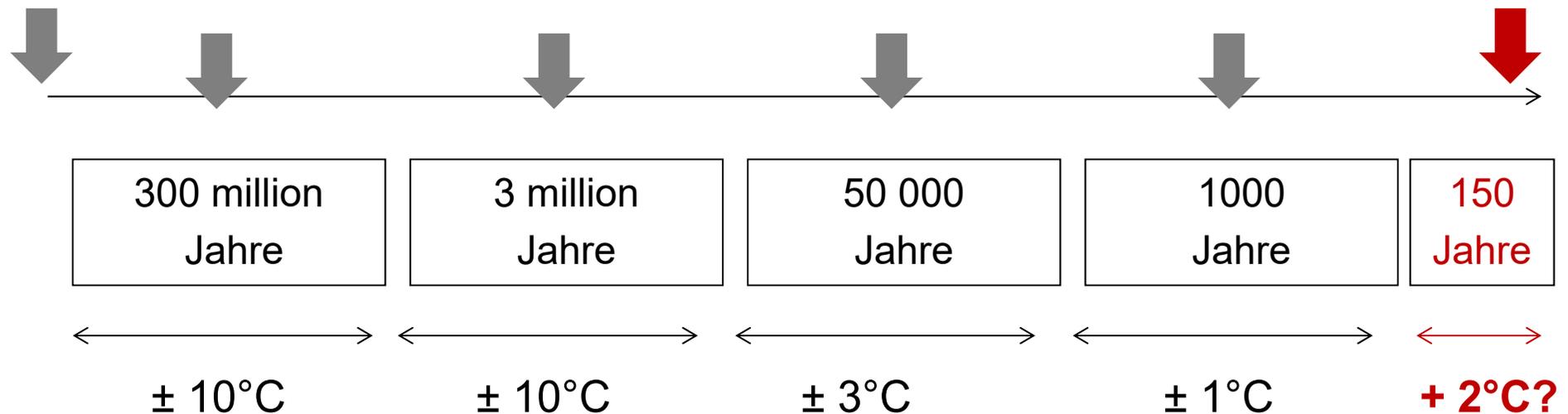


Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext





Einordnung der aktuellen Entwicklung in historischen Kontext



Klima ist durch Kälte – und Wärmeperioden gekennzeichnet.

Die aktuellen Entwicklungen ordnen sich nicht in die natürlichen Klimaschwankungen ein!



Referenzen

William F. Ruddiman (2013): Earth's Climate: Past and Future. W. H. Freeman, 3rd ed. 2013

IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. <https://www.de-ipcc.de>, zuletzt besucht 28.06.2019

Berner R. A., Lasaga A. C., and Garrels R. M. (1983) The carbonate- silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. Amer. J. Sci. 283, 641- 683.

DM Etheridge, LP Steele, RL Langenfelds, RJ Francey, J.-M. Barnola und VI Morgan. 1998. Historische CO₂ Datensätze aus der Law Dome DE08, DE08-2 und DSS Eisbohrkernen. In Trends: Ein Kompendium der Daten Globale Umweltveränderungen. Kohlendioxid-Informationen Analyse Mitte, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA



Kontakt

Prof. Ulrike Feistel

Hochschule für Technik und Wirtschaft

Wasserwesen – Ingenierhydrologie

Friedrich List Platz 1

0351 462 2668

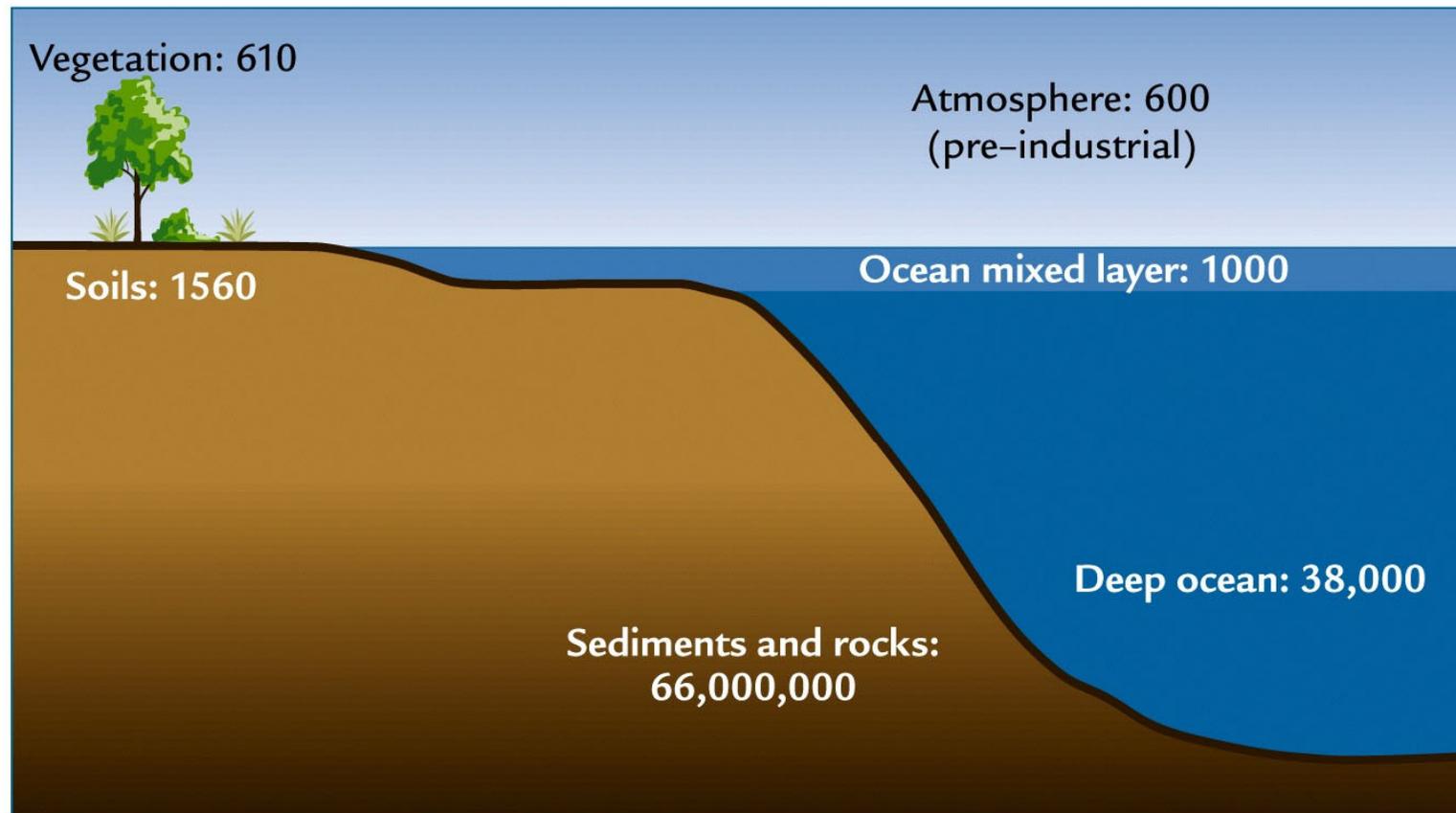
ulrike.feistel@htw-dresde.de



Zusatz



- Carbon cycle

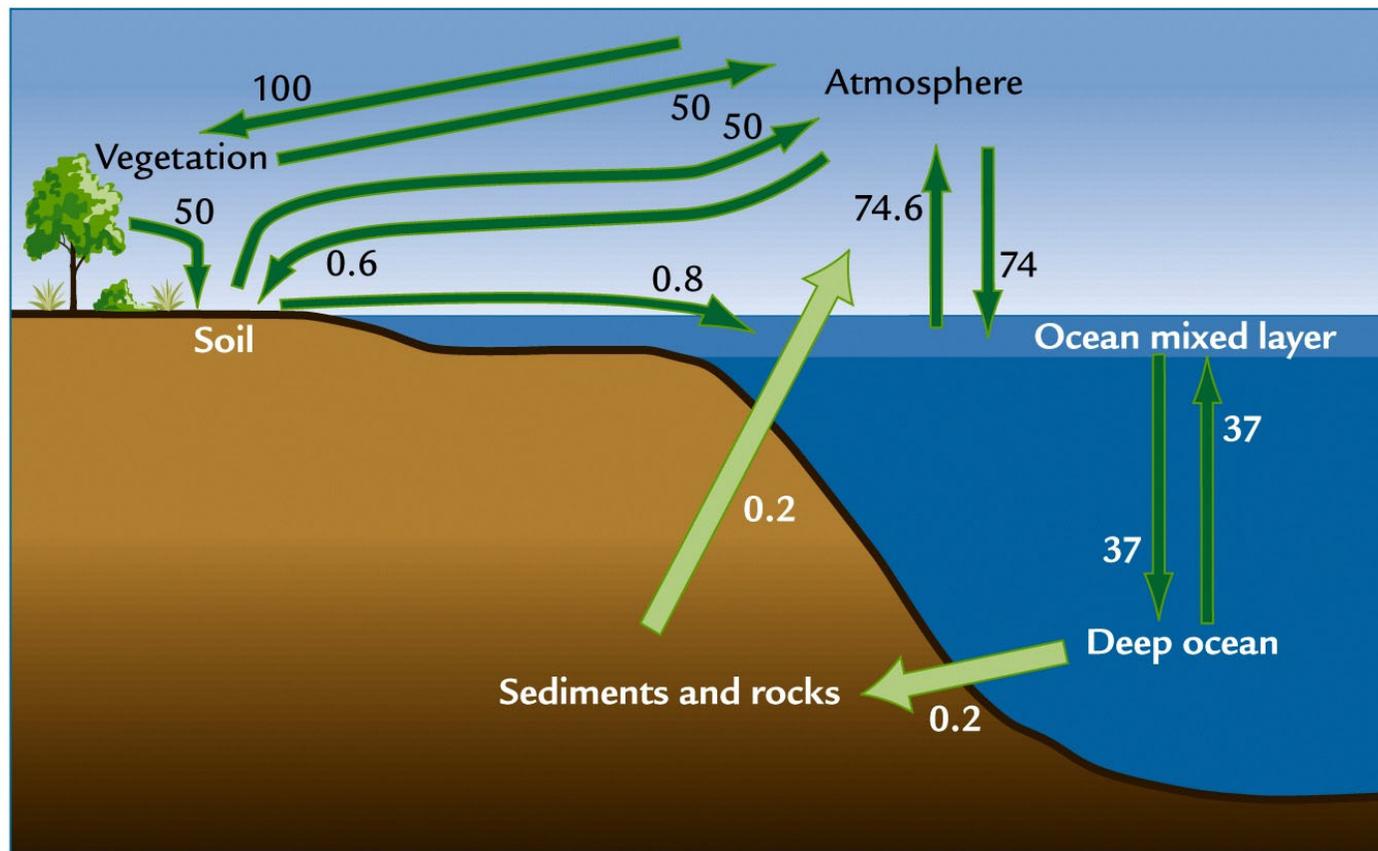


A Major carbon reservoirs (gigatons; 1 gigaton = 10^{15} grams)

Ruddiman, 2014



- Carbon cycle

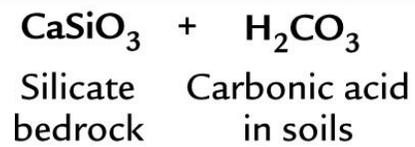
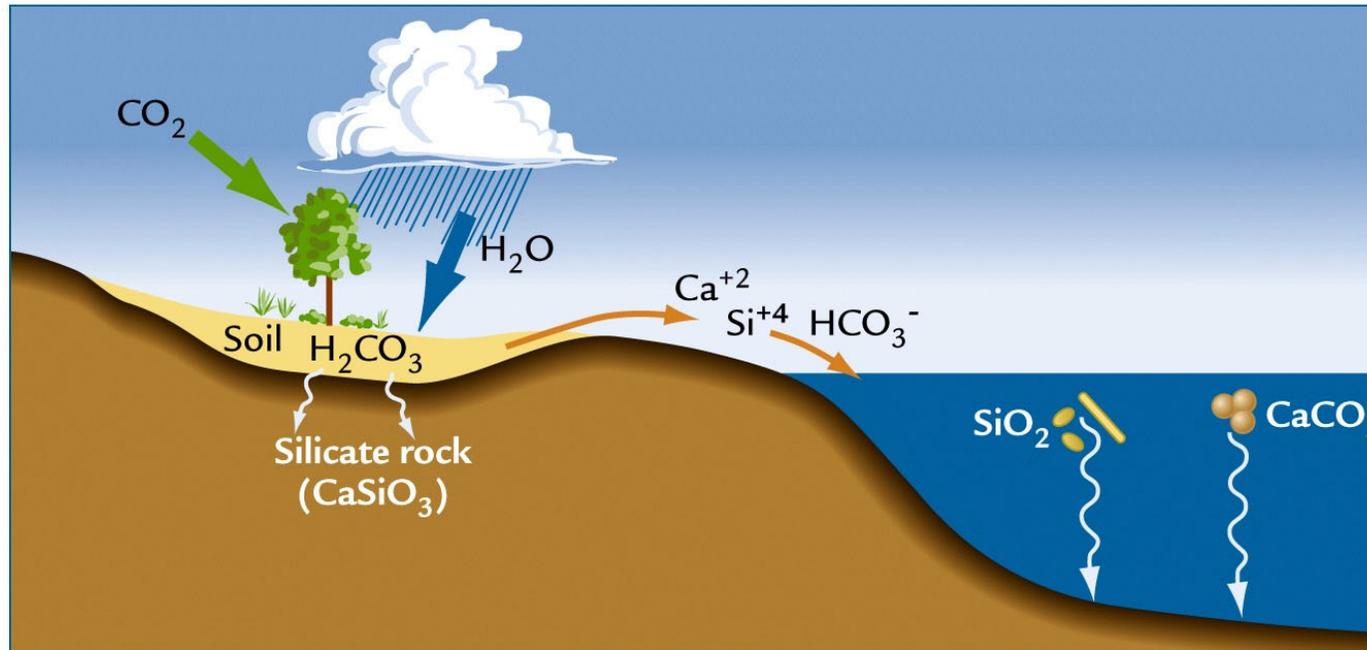


B Carbon exchange rates (gigatons/year)

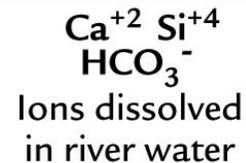
Ruddiman, 2014



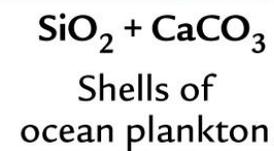
Role of carbon - fluxes



Weathering on land



Transport in rivers



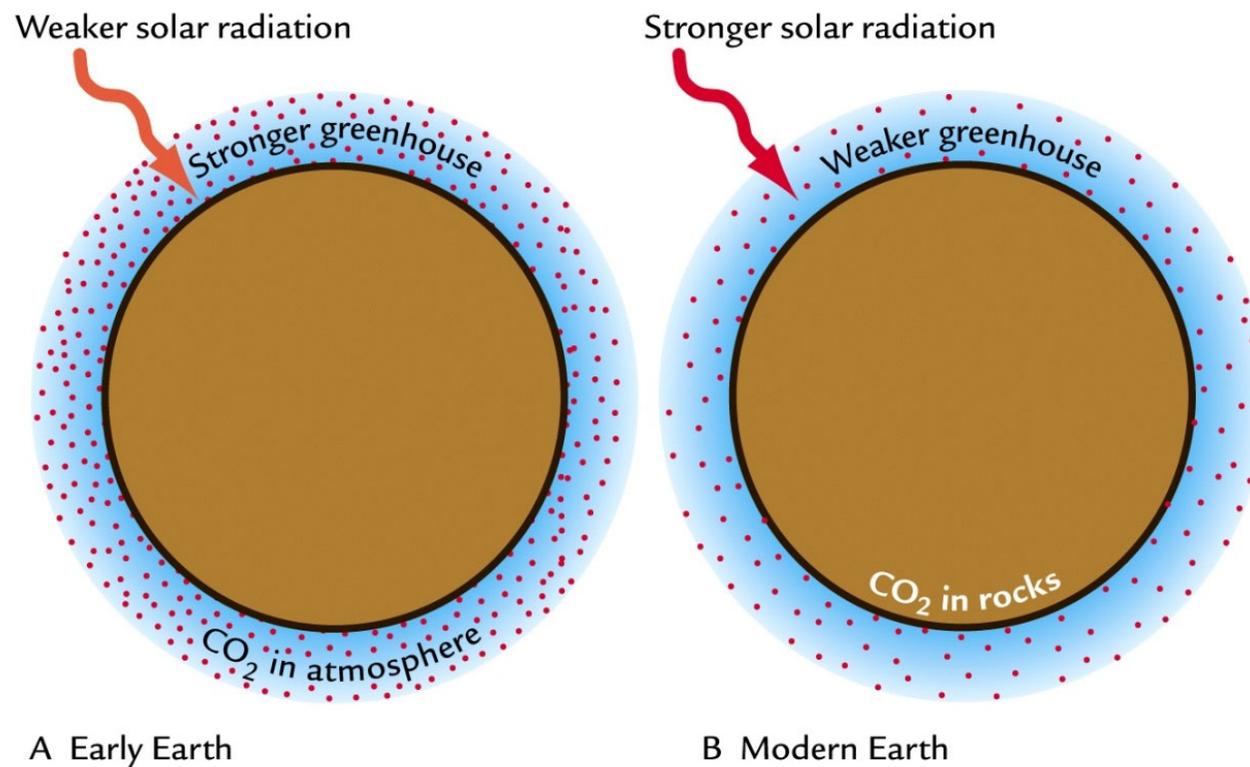
Deposition in ocean

CO_2 removal from the atmosphere by chemical weathering

Ruddiman, 2014



Role of carbon: compensating effects

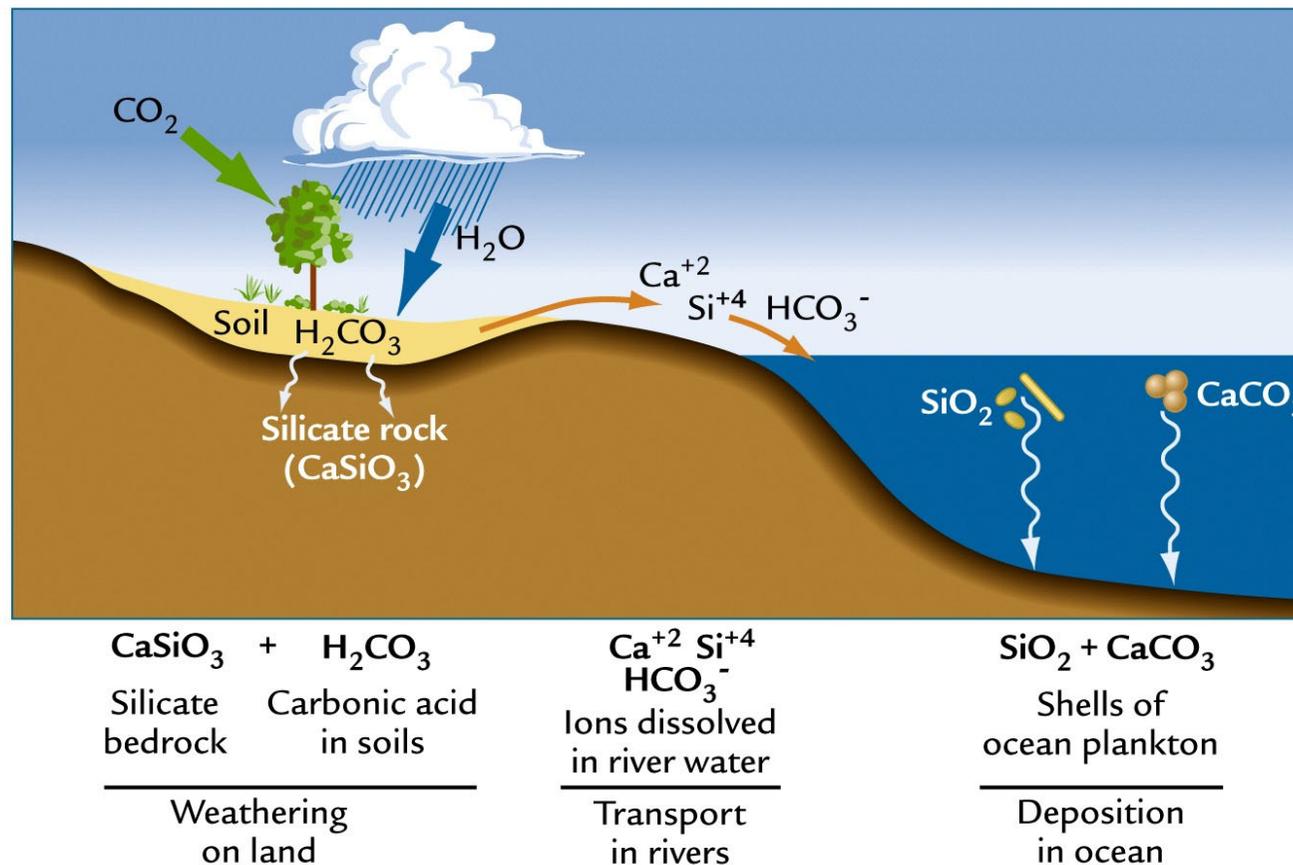


Ruddiman, 2014



Tektonische Prozesse

- Hebungs- und Verwitterungsprozesse (CO_2 aus der Atmosphäre)



Ruddiman, 2014