Kohlendioxid und Kohlenstoffkreislauf (Teil 2)

Wiederholung: Klimasensitivität des atmosphärischen Kohlendioxids

Um wieviel erhöht sich die mittlere globale Temperatur der Erdoberfläche, wenn der Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid verdoppelt wird (d. h. von 0,03% auf 0,06%)?

→ Der IPCC schätzt den Wert mittlerweile auf 1,5 bis 2,8° bis zum Jahre 2100
(alte Schätzung 1,1 bis 5,1° bis 2100)

Die Klimasensitivität des CO2 ist ein wichtiger Eingabeparameter in die heute verwendeten Klimamodelle. Aber erst in Verbindung mit der in die Modelle eingehenden Wasserdampfverstärkung ergeben sich die alarmistischen Temperaturerhöhungen, die als Grundlage für politisches Handeln dienen. Ohne Wasserdampfrückkopplung wäre die postulierte Wirkung des CO2 auf das Klimasystem gering.

Im Klimasystem der Erde ist der CO2-Gehalt eine Regelgröße, die über positive und negative Rückkopplungen über den **Kohlenstoffkreislauf** das Erdklima (ausgedrückt durch die jährliche Oberflächenmitteltemperatur) in engen Grenzen über geologische Zeiträume stabil hält. Versagt dieser Regelkreis, kann es zu einer Runaway Glaciation (gab es schon mal) oder zu einer Treibhausinstabilität kommen (kommt sicher in der fernen Zukunft).

Kohlenstoffkreislauf

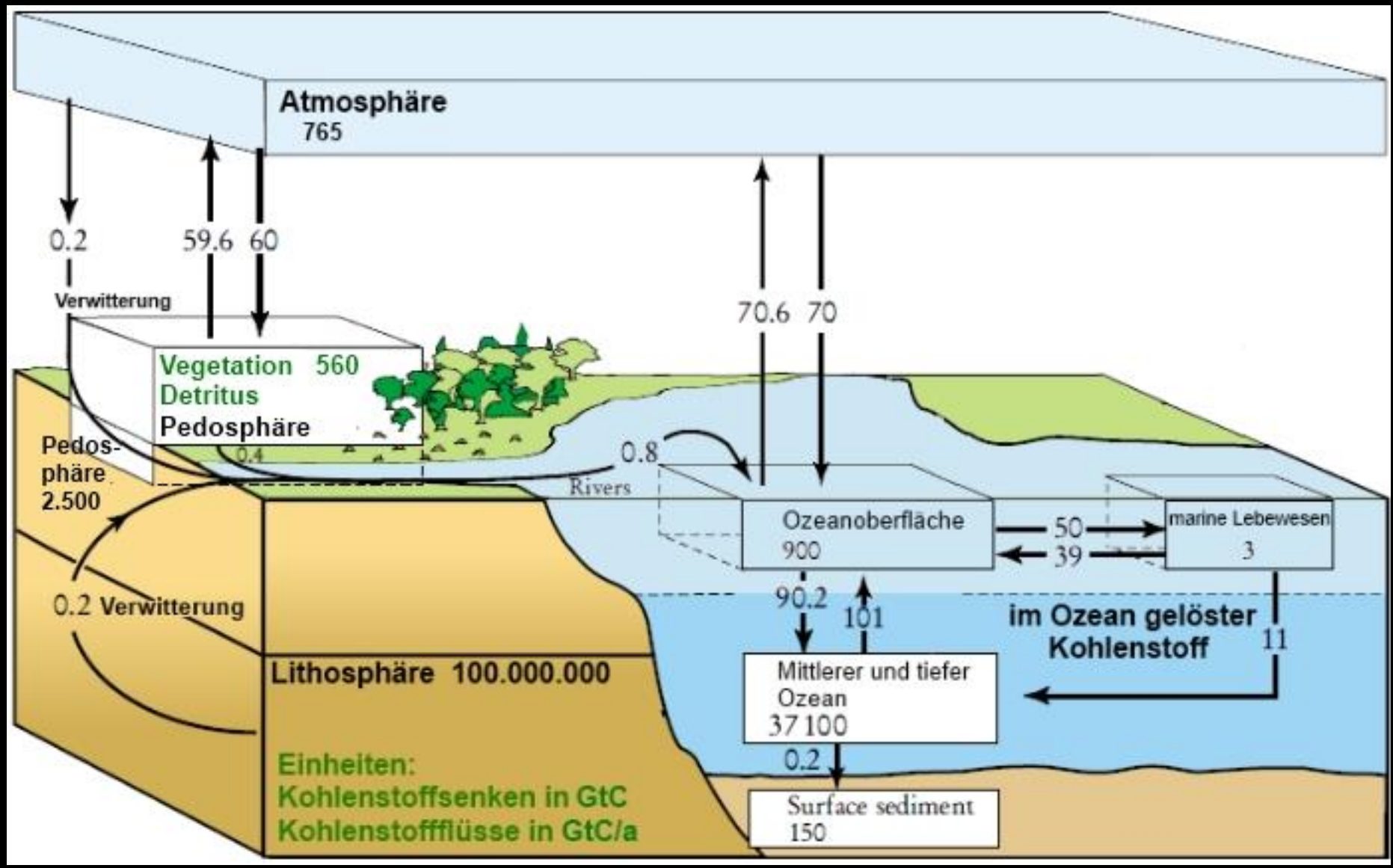
Der **Kohlenstoffkreislauf** beschreibt das System der chemischen Umwandlungen kohlenstoffhaltiger Verbindungen im globalen Erdsystem (Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre) sowie den Austausch dieser Verbindungen zwischen diesen Sphären.

Auf der Makroebene des Erdsystems ist der Gesamtkohlenstoffgehalt konstant und beträgt etwa 75 Millionen Gigatonnen (75 Gt; 1 Gt = 1 Milliarde Tonnen))

Jede der vier Sphären ist durch die **Speicherkapazität des Kohlenstoffs**, dessen **mittlere Verweildauer**, seine **Zu- und Abflüsse** sowie den **spezifischen Speicherformen** des Kohlenstoffs charakterisiert.

- **Atmosphäre**: 750 Gt (0,001%) (CO_2, CH_4, CO, FCKW, CCl_4, Rußpartikel)
- **Hydrosphäre**: 38.000 Gt (0,05%) (gelöstes CO_2, Karbonationen)
- **Lithosphäre**: 74,85 Millionen Gt (99,8%) (Karbonatgesteine, Kerogene, Gashydrate, fossile Energieträger, Böden
- **Biosphäre**: 803 Gt (0,001%) (Karbonate (Außensklette von Meerestieren), Chitin …)

Vereinfachter Kohlenstoffkreislauf der Erde mit Zu- und Abflüssen



Das Erdsystem ist in Bezug auf Zuflüsse und Abflüsse zwischen den Sphären immer im Gleichgewicht. Störungen des Systems (z. B. erhöhte Sonneneinstrahlung) werden durch eine Neueinregulierung des Systems ausgeglichen.

→ Änderungen der Randbedingungen (Wassertemperatur, Druckbedingungen) und der Konzentrationen ändern auch die Gleichgewichtslage.

<u>Beispiel:</u>

Erhöhung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre führt dazu, dass die Hydrosphäre mehr CO_2 aufnimmt (Weltmeere als CO_2-Senke)

Führt dagegen eine Erhöhung der CO_2-Konzentration der Atmosphäre zu einer Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur, dann wird sich im Laufe der Zeit auch die Temperatur der Ozeane entsprechend erhöhen und dessen Fähigkeit, CO_2 zu lösen, abnehmen.

Will man einigermaßen realistische Klimamodelle entwerfen, müssen derartige Stoffflüsse im Detail durch entsprechende Bilanzgleichungen modelliert werden.

→ z. B. detaillierte Erkenntnisse über CO_2 –Quellen und Senken, Zeitskalen, Wechselwirkungen

Einige Eckpunkte des globalen Kohlenstoffzyklus

Im Gleichgewichtsfall sind alle Bilanzen ausgeglichen

Durch die globale Plattentektonik bedingter Teilkreislauf (~100 Millionen a)

Wichtigste Kohlenstoffquelle: Entgasung von Vulkanen
Wichtigste Kohlenstoffsenke: Subduktion von Karbonatgesteinen im Erdmantel

- Karbonatgesteine (wie z. B. Dolomit) entstehen, wenn in den Weltmeeren Karbonationen in die Schalen von Meerestieren eingebaut werden, dieses Schalen nach deren Tod auf dem Meeresboden sedimentieren, dort Karbonatgesteine bilden, die dann an den destruktiven Plattenrändern subduziert werden…

- Karbonationen entstehen durch die chemische Verwitterung an Land – insbesondere unter warmfeuchten Bedingungen. Das dafür benötigte CO_2 wird aus der Atmosphäre entnommen, die Karbonationen durch die Flüsse in die Weltmeere verfrachtet.

Rückkopplungen: Kontinentaldrift (Verteilung oder Konzentration („Pangäa“) der Kontinentalplatten mit Auswirkungen auf die Verwitterungsrate)

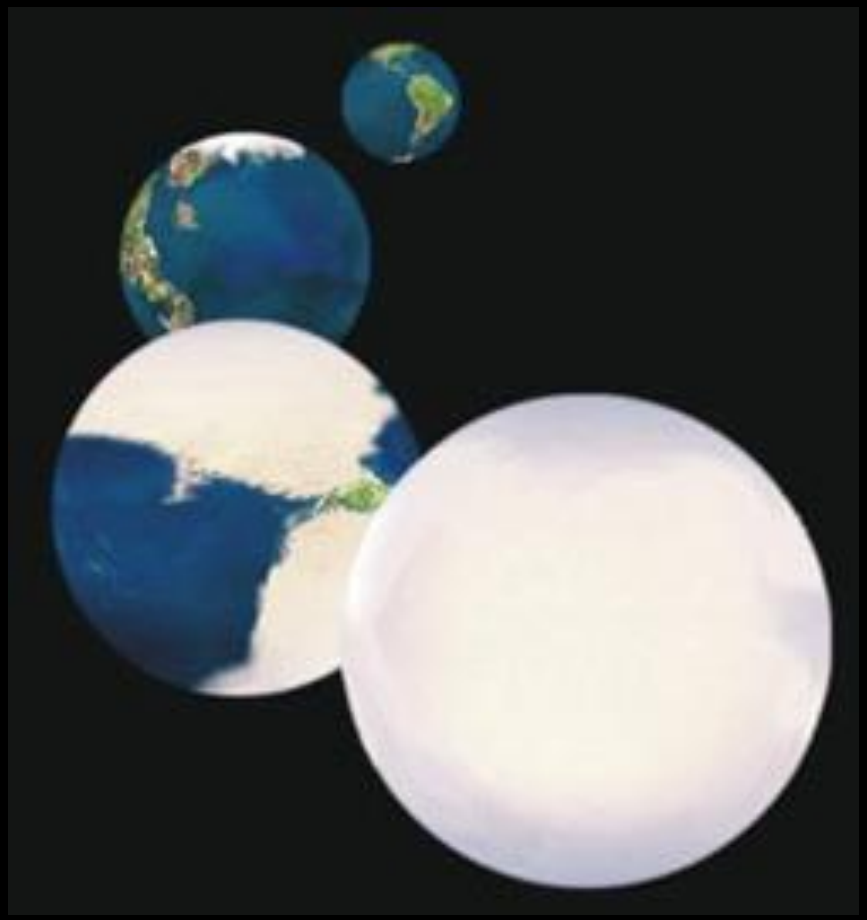
Die Verteilung der Kontinentalblöcke auf der Erde legt entscheidend die großräumigen atmosphärischen Strömungssysteme fest.

→ große aride Gebiete -> geringe Verwitterungsrate -> kleine CO_2-Senke
→ große Gebiete mit feuchten Klima -> hohe Verwitterungsrate -> große CO_2-Senke

Beispiel: Runaway Glaciation

Im Neoproterozoikum (vor ca. 750 Millionen Jahren) war die Erde mehrmals bis fast zum Äquator (oder auch vollständig) mit Eis bedeckt.

→ Schneeball Erde



Globale Mitteltemperatur sinkt

Wenn die Vergletscherung der Erde zunimmt, nimmt auch das Albedo zu und die Gleichgewichtstemperatur sinkt

→ **NEGATIVE RÜCKKOPPLUNG**

Wenn die Vergletscherung einen gewissen Grad erreicht hat, kippt das System Erde in einen neuen, irreversiblen Zustand

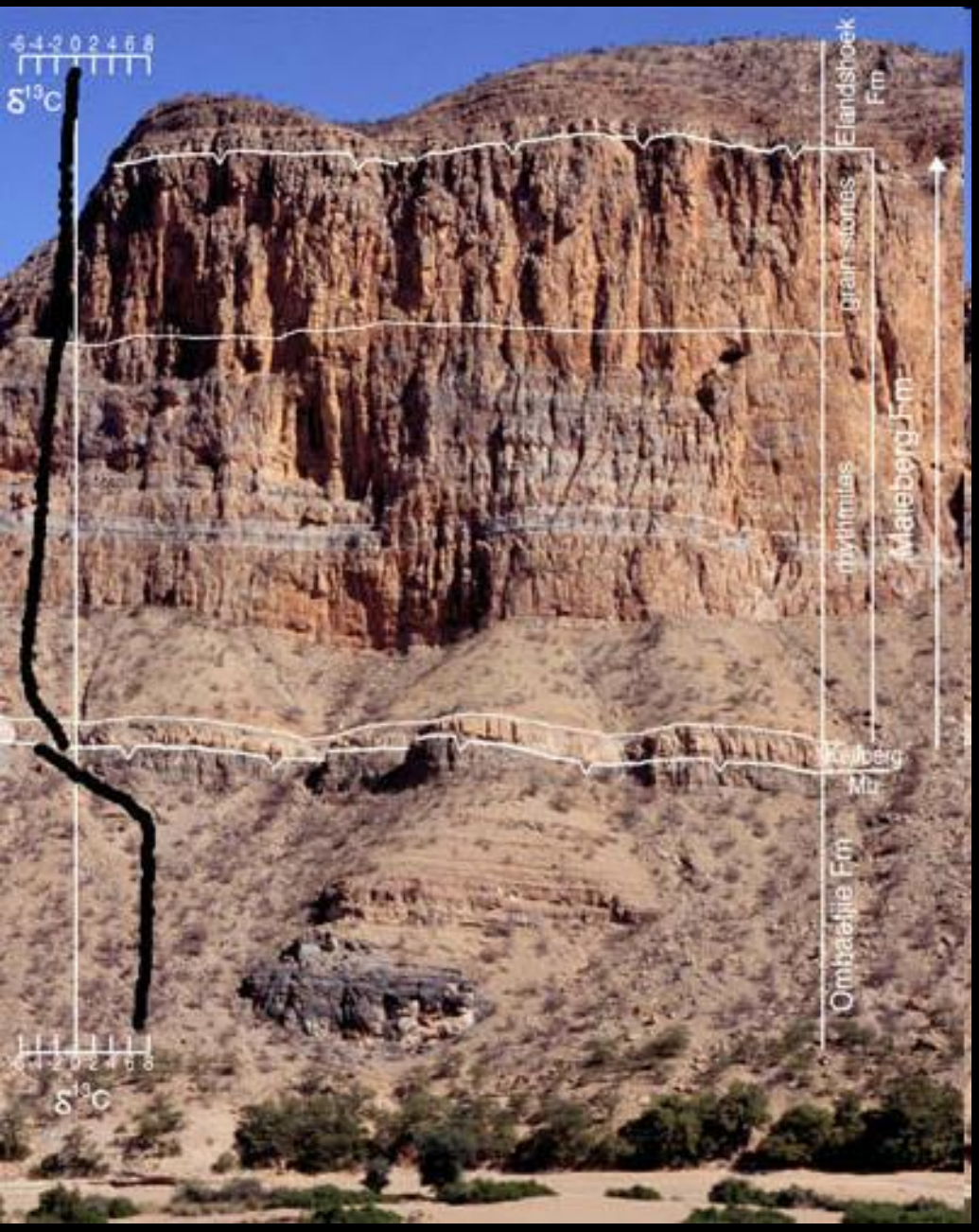
Globale Vergletscherung

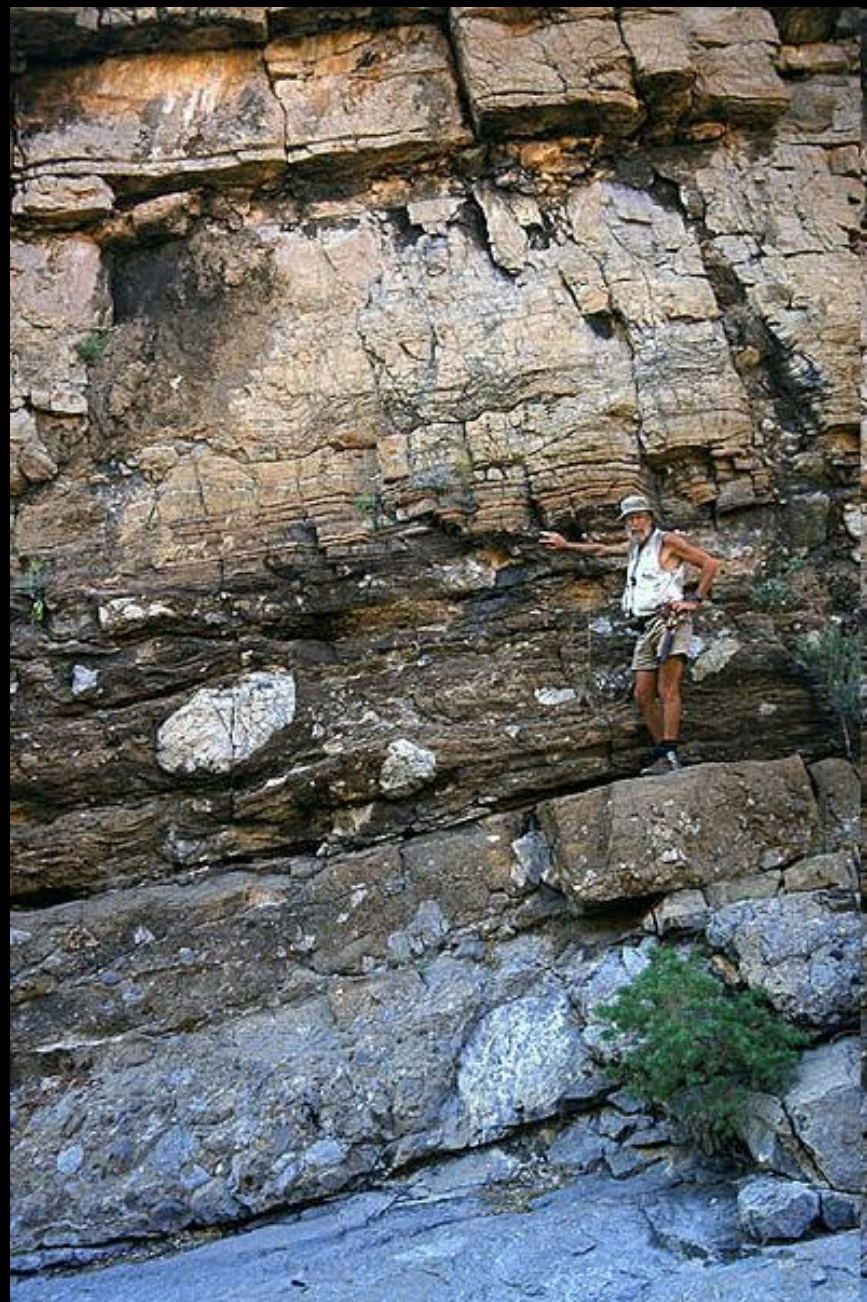
Die Theorie des „Schneeballs Erde“ liefert Antworten auf folgende Fragestellungen:

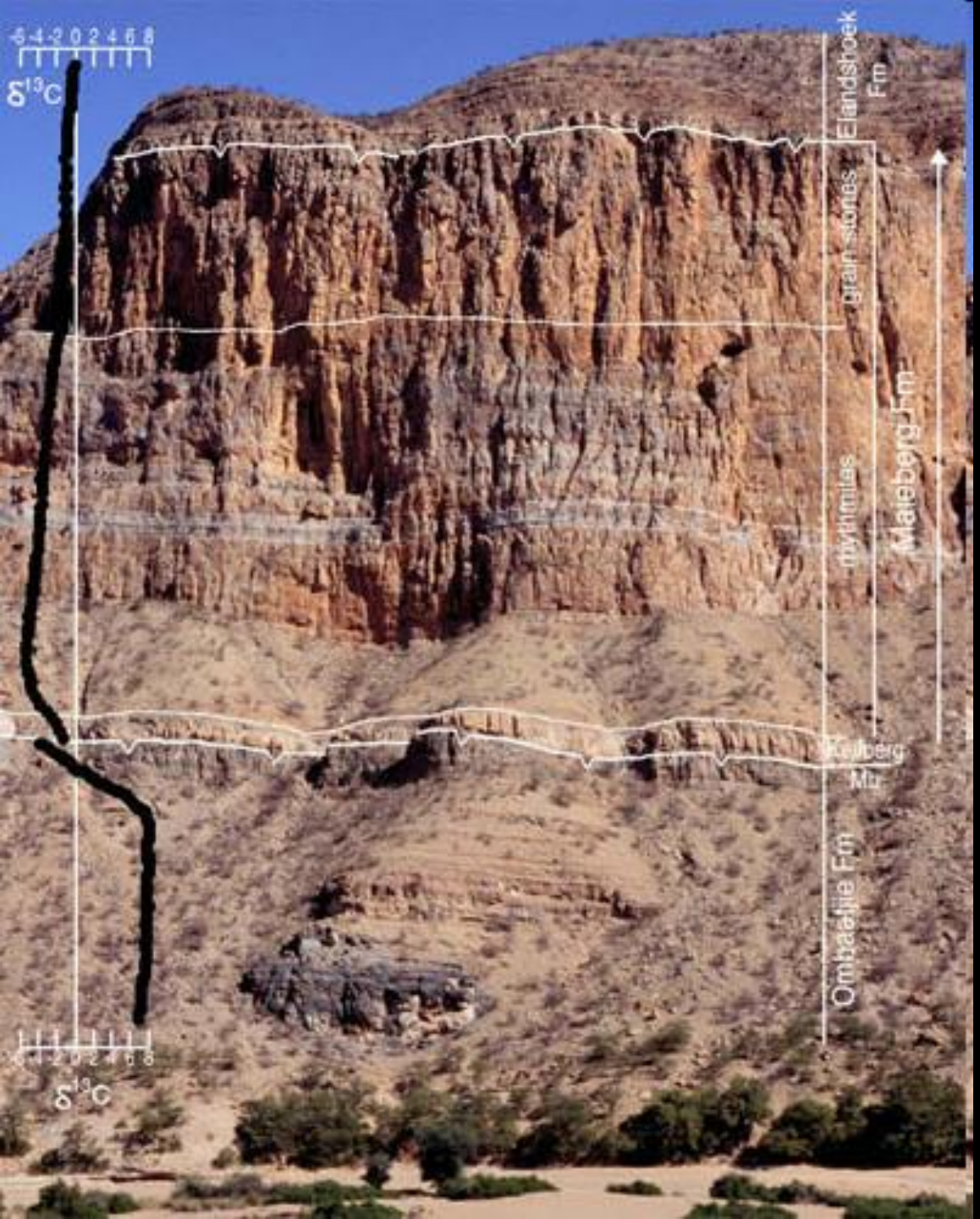
- Wie ist es möglich, daß in neoproterozoischen Ablagerungen weltweit Tillite vorkommen?
- Wie entstanden die Einlagerungen von Eisenbändertonen in diesen Schichten?
- Wieso folgen auf dem Gletscherschutt sofort Karbonatgesteine, die sich nur unter tropischen Bedingungen bilden können und wie erklärt sich ihre außergewöhnliche Mächtigkeit? Insbesondere die eingelagerten Aragonitkristalle deuten auf eine Temperatur von ca. 50° C hin.
- Problem des Kohlenstoff-Isotopenverhältnisses
- Wie erklären sich die biologischen Evolutionssprünge im Proterozoikum ?

→ Prokaryonten – Eukarionten
→ Eukaryonten – Metazoa → Kambrische Explosion

Skelettküste Namibia: Mächtige Schichten von Karbonatgesteinen







Deckgebirge

Schichten Karbonatgesteinen

PROBLEM: Karbonatgesteine entstehen nur unter tropischen Bedingungen

Mannshohe Aragonitkristalle

Glaziale Tillite

Tiefseegesteine (Ophiolithe) aus dem frühen Proterozoikum

(850 – 630 Mill. Jahre)

Gletscherschrammen auf neoproterozoischen Gesteinen (Australien)

Im Gletscherschutt sind Rotsedimente (Eisen) eingelagert

Itabirite – Eisenbändertone

Problem:
Rotsedimente treten normalerweise nur in der frühesten Erdgeschichte auf, als die Ozeane und die Erdatmosphäre kaum Sauerstoff enthielten

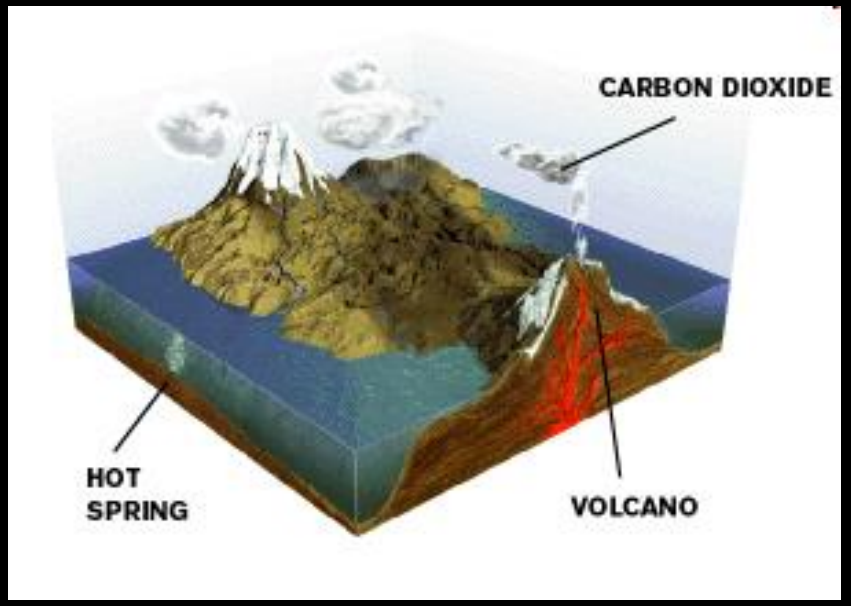
Beginn des Proterozoikums (2500 Mill. Jahre) → zuerst abiotische, dann verstärkt biotische Sauerstoffbildung (Photosynthese der Cyanobakterien)

→ Fe^{2+} Ionen werden oxidiert -> Fe_2O_3 Hämatit - Rotsedimente

Runaway Glaciation – Szenario:

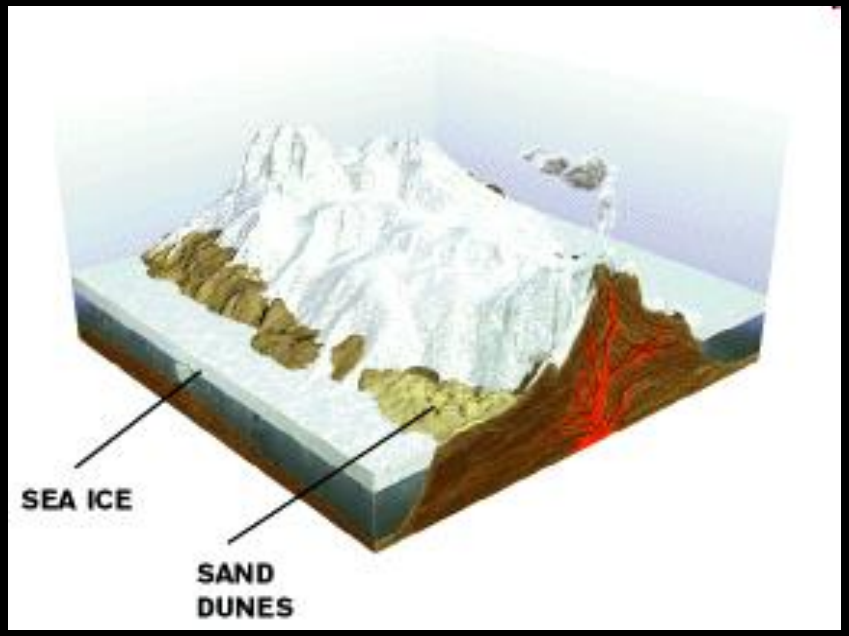
1. Phase

Der Superkontinent Rhodinia zerbrach in mehrere Teile, die sich im Äquatorbereich der Erde konzentrierten. Ehemals trockene Binnenlandregionen wurden zu feuchten Küstenregionen was natürlich Auswirkungen auf das großräumige Klima hatte. Der Regen wusch nach und nach das Kohlendioxid aus der Atmosphäre und die kontinentalen Gesteine begannen dadurch schneller zu verwittern. Der durch den Treibhauseffekt bedingte Anteil an der Temperatur der Erde verringerte sich, was dazu führte, daß die Erde von den Polen ausgehend langsam zu vereisen begann. Da durch die sich ausbreitenden hellen Eisregionen das Albedo zunahm, nahm aufgrund dieser Rückkopplung auch die Vereisung immer mehr zu bis wahrscheinlich bereits nach wenigen Tausend Jahren die gesamte Erde von einer dicken Eisschicht bedeckt war.



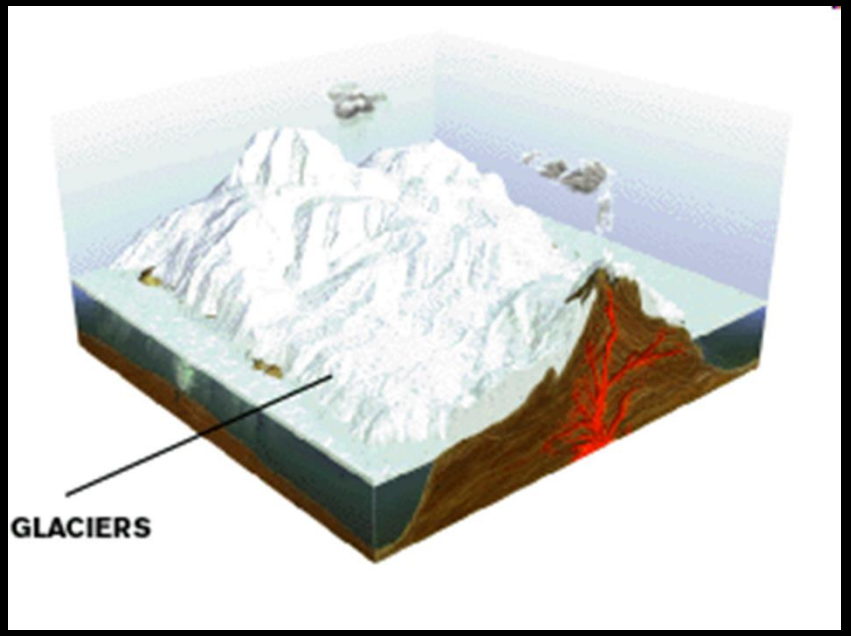
2. Phase

Als die globale Vereisung ihren Höhepunkt erreichte, war die mittlere Temperatur der Erde auf ca. -50°C abgesackt und die Ozeane bis in rund einem Kilometer Tiefe zugefroren. Hier stellte sich ein Gleichgewichtszustand ein, da ja das ozeanische Wasser weiter durch die besonders aus den Riftsystemen austretende Wärme geheizt wurde. Auf den Kontinenten verschwanden aufgrund des wasserdampfarmen ariden Klimas langsam die Eismassen durch Sublimation und es entstanden riesige Sandwüsten. Nur hier und da erreichten Vulkane die Oberfläche und blasen ungestört Kohlendioxid in die Atmosphäre so wie heute die Schlote mancher Industriebetriebe. Da Niederschläge fehlen, kann sich das Kohlendioxid im Laufe einiger 10 Millionen Jahre wieder in der Atmosphäre verstärkt ansammeln.



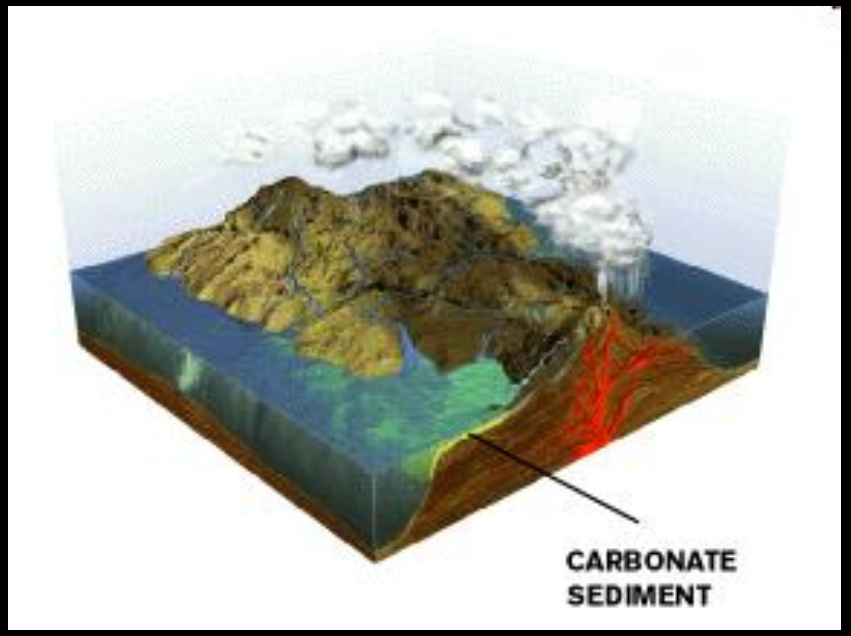
3. Phase

Das führt dazu, daß die mittlere Temperatur aufgrund des Treibhauseffekts wieder kontinuierlich ansteigt, wodurch das Meereis an seiner Oberfläche zu sublimieren beginnt und dadurch die Erdatmosphäre mit Wasserdampf anreichert. Das verstärkt wiederum den Treibhauseffekt, da Wasserdampf ein starkes Treibhausgas ist. Es kommt zur Wolkenbildung und es setzen Niederschläge ein, die kurzzeitig die kontinentalen Gletscher stark anwachsen lassen. Nach und nach dünnt aufgrund der ansteigenden Temperaturen in den Tropen das Eis aus bis endlich wieder offene Wasserflächen entstehen. Das Albedo verringert sich, das Eis schmilzt immer schneller und innerhalb kürzester Zeit verwandelt sich die Erde aus einem Kühlschrank in eine feuchtheiße Sauna mit einer Jahresmitteltemperatur von ca. 50°C.



4. Phase

Der ausufernde Treibhauseffekt konnte aber glücklicherweise durch einen anderen Rückkopplungsprozeß gestoppt werden. Die plötzliche starke Temperaturerhöhung (die der Geologe an den riesigen Schichten von Karbonathesteinen direkt über einer dünnen Schicht aus Tilliten ablesen kann) führte zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs. Die dadurch bedingten Starkregen wuschen das Kohlendioxid kontinuierlich aus der Atmosphäre aus. Das dabei mit Kohlensäure angereicherte Wasser beschleunigte die Verwitterung des Gesteinschutts, welches die getauten Gletscher zurückgelassen haben. Bei diesem Prozeß entstehen Hydrokarbonate, die in die Ozeane geschwemmt werden, dort mit Kalzium- und Magnesiumionen reagieren und sich als unlösbares Karbonatgestein am Meeresboden ablagern.



Entstehung der Eisenablagerungen in dem glazialen Gesteinsschutt

Rotbändertone = Itabrite

tauchen normalerweise nur in der frühesten Erdgeschichte auf, als die Ozeane und die Erdatmosphäre noch kaum Sauerstoff enthielten

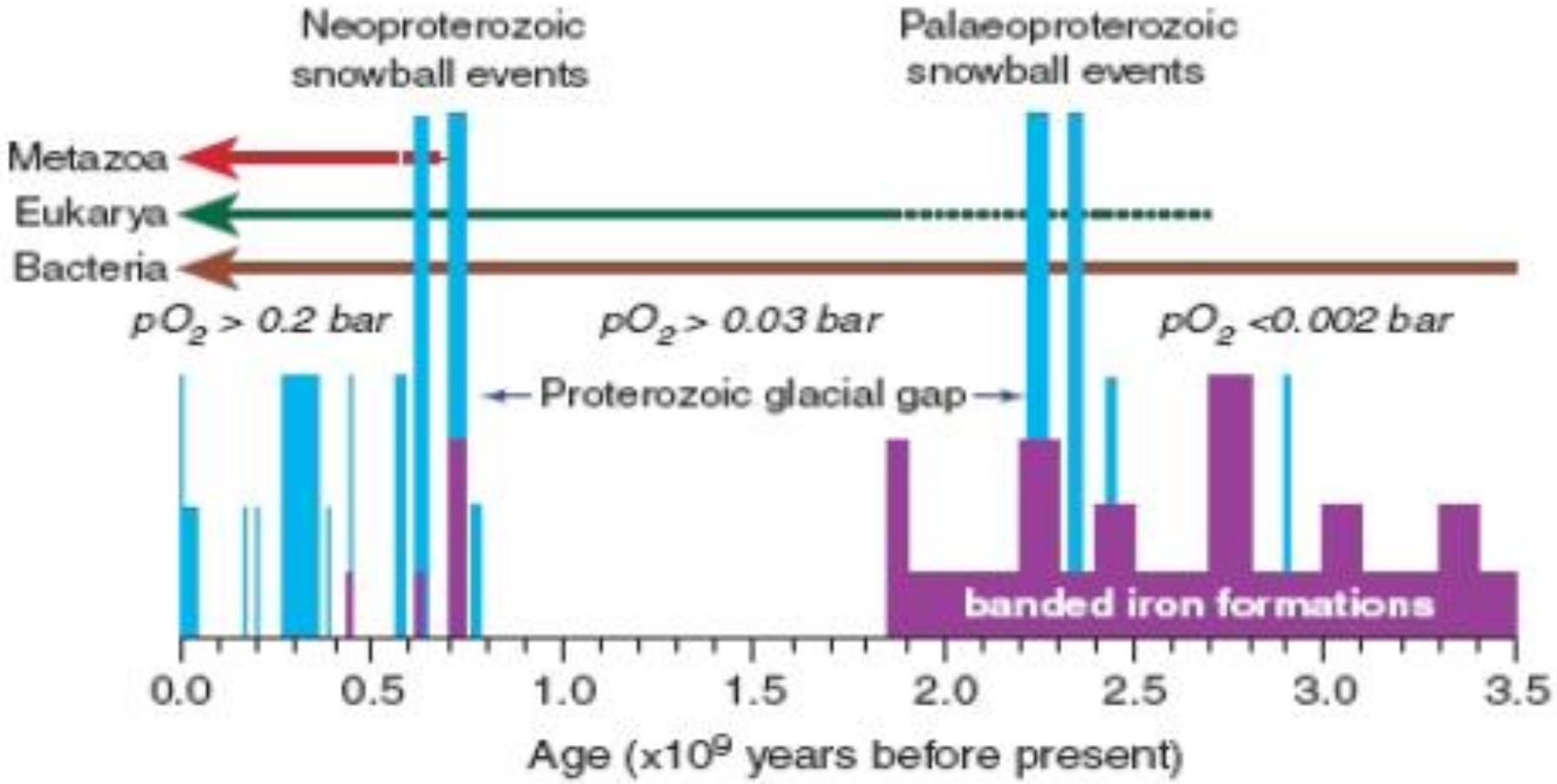
Eisen ist im zweiwertigen Zustand in Wasser löslich

→ Sauerstoff: Eisen geht in den unlöslichen dreiwertigen Zustand über und fällt als Hämatit aus

ROTSEDIMENTE

Durch die globale Eisbedeckung waren die Ozeane für Millionen von Jahren von der Atmosphäre abgeschnitten

→ Black Smoker (Rifts): Anreicherung des Meerwassers mit zweiwertigen Eisenionen bei gleichzeitiger Abnahme des Sauerstoffgehalts



Paläoproterozoische Vereisungen (vor ca. 2.3 Milliarden Jahren)

→ Procaryota – Eucaryota

Neoproterozoische Vereisungen (vor ca, 0.7 Milliarden Jahren)

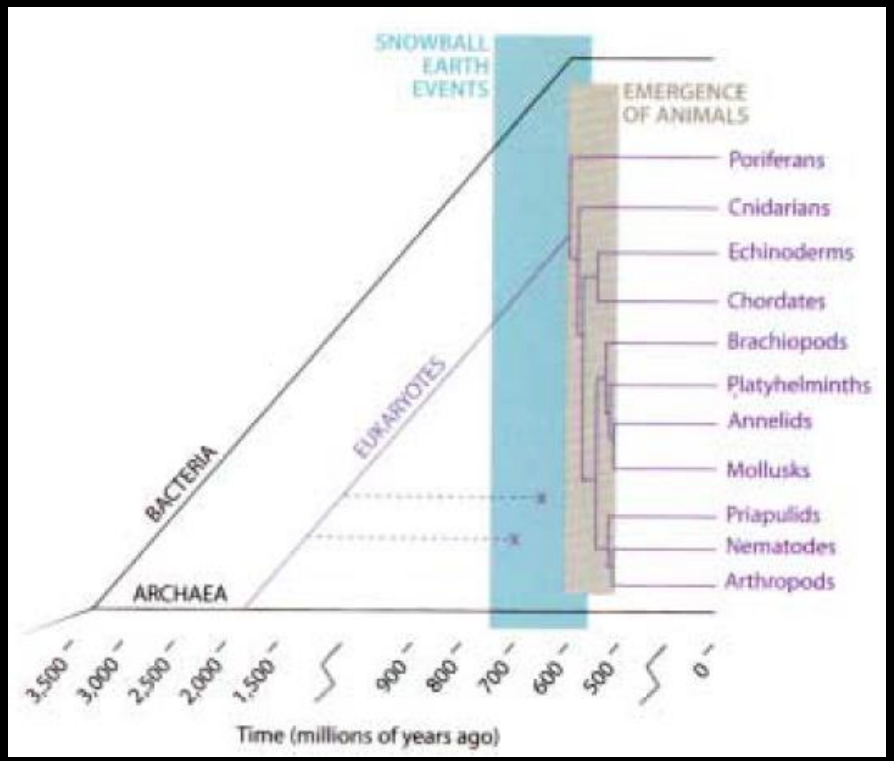
→ Eucaryota – Metazoa -- kambrische Explosion --

→ Jede Totalvereisung führte zu einem Massensterben.

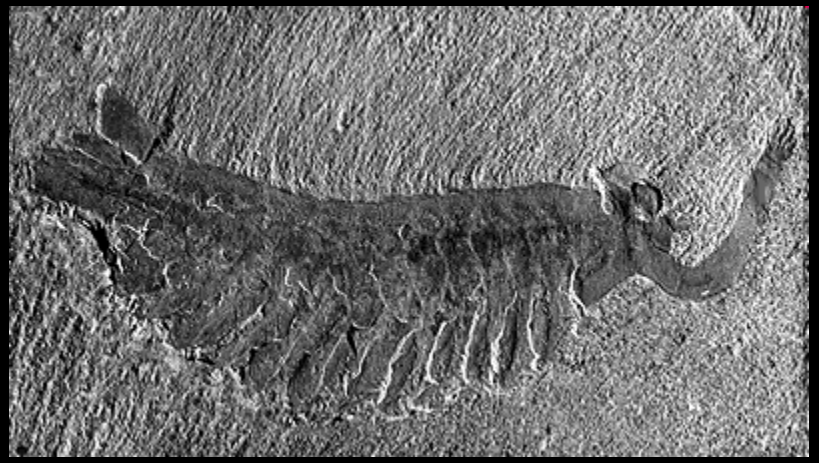
→ Es konnten nur Organismen im Bereich ökologischer Nischen überleben

- heiße Quellen am Meeresgrund (Isolierung von Populationen)
- Unterseite der Eisflächen im Bereich der Tropen (Cyanobakterien)

→ Der Übergang zum Treibhausklima führte zu „biologischen Streß“ mit erhöhter Mutationsrate und Besiedlung zuvor ungenutzter Lebensräume



Kambrische Explosion



Erkenntnis: Ohne Plattentektonik und funktionierenden Kohlenstoffkreislauf würde die Erde mit hoher Wahrscheinlichkeit wie einer der Eismonde Jupiters aussehen…

Für das Aufhalten einer Runaway Glaciation reicht aufgrund der gertriggerten Rückkopplungsmechanismen eine Klimasensitivität des CO_2 von ~ 1° aus.

Um ein Klimasystem realistisch modellieren zu können, müssen alle wesentlichen Rückkopplungsprozesse und Stoffbilanzen sehr genau bekannt sein und als Randbedingungen in die Rechnungen eingehen.

Die Erdgeschichte zeigt, daß das System Erde mit seinen komplexen klimatischen Rückkopplungssystemen wie ein sich selbstregulierender Thermostat arbeitet. Der CO_2-Gehalt der Erdatmosphäre stellt dabei eine wichtige Regelgröße dar.

→ obwohl die Sonnenleuchtkraft in den letzten 4,5 Milliarden Jahren um ~30% zugenommen hat, blieben die Oberflächentemperaturen der Erde im Wesentlichen im unteren positiven Bereich.

Stichwort: Paradoxon der schwachen Sonne