

## Ergänzung 1 zu Posten 3

## Das Klima – eine Geschichte des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes: Von «Eis-» und «Backofen-Erden»

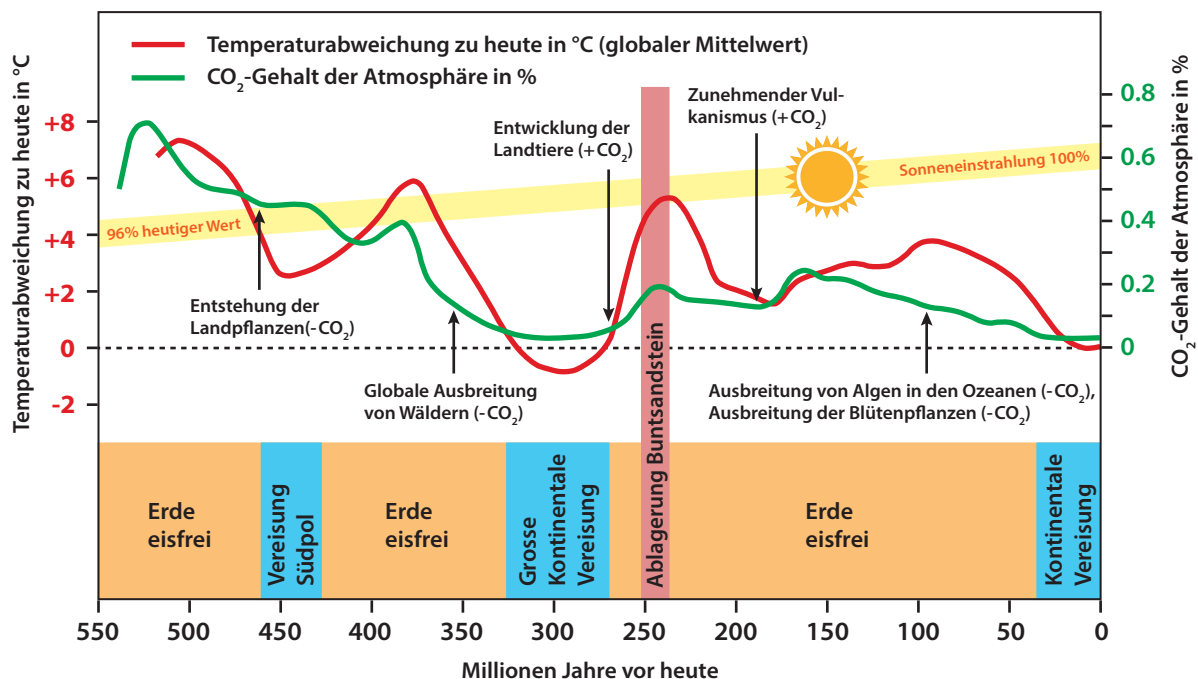
Erinnern Sie sich, was Sie an Posten 1 (Schulhausbrunnen) über die Klimaschwankungen der letzten Million Jahre erfahren haben? Diese Klimaschwankungen waren schwach im Vergleich zu den Klimaextremen, welche die Erde in früheren Zeiten durchgemacht hat.

### CO<sub>2</sub>-Gehalt und Temperatur

Die Temperatur der Atmosphäre hing im Laufe der Erdgeschichte und hängt auch heute massgeblich von deren CO<sub>2</sub>-Gehalt ab: Je höher der CO<sub>2</sub>-Gehalt, desto höher ist auch die Temperatur der Atmosphäre (Abb. 1). Die heutigen, als angenehm empfundenen, moderaten Temperaturen auf der Erde sind das Ergebnis einer drastischen Verringerung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre im Lauf der Erdgeschichte.

Wovon aber hing der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre im Lauf der Erdgeschichte ab?

- Atmosphäre und Ozean stehen durch Diffusion durch die Wasseroberfläche in dauerndem Gasaustausch. Ins Meerwasser diffundiertes CO<sub>2</sub> reagiert mit Wasser und Kalzium-Ionen zu Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Kalk (CaCO<sub>3</sub>, Abb. 2), wodurch der Atmosphäre dauerhaft CO<sub>2</sub> entzogen wird.
- Bei der Verringerung des CO<sub>2</sub>-Gehalts spielten im Lauf der Erdgeschichte tierische Lebewesen eine zentrale Rolle: Diese entziehen der Atmosphäre CO<sub>2</sub>, das sie zum eigenen Aufbau benötigen. So bauen beispielsweise unzählige Meereslebewesen wie Muscheln, Schnecken oder auch Protozoen (einzellige Lebewesen) Kalkschalen auf. Den Kalk dafür bilden sie aus Kalzium-Ionen und CO<sub>2</sub>, das sie dem Meerwasser entziehen (biogene Kalkbildung, Abb. 2). Dies hat zwei Effekte: Das Meerwasser kann dadurch laufend weiteres CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnehmen und die Schalen der Lebewesen sinken nach deren Tod zu Boden und bilden Sedimentschichten, in welchen das CO<sub>2</sub> für Jahrtausenden gespeichert bleibt und damit der Atmosphäre entzogen wird.



**Abb. 1:** Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Gehalt und mittlere Temperatur der Atmosphäre seit 550 Mio. Jahren. Die Temperaturkurve zeigt eine ähnliche Entwicklung wie die CO<sub>2</sub>-Kurve. Dies deutet auf die Abhängigkeit der Temperatur vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre hin. Der Buntsandstein wurde in einer ausserordentlich warmen Periode abgelagert. CO<sub>2</sub>- und Temperaturwerte lassen sich durch aufwändige Laboranalysen und Berechnungen aus Sedimentgesteinen abschätzen.

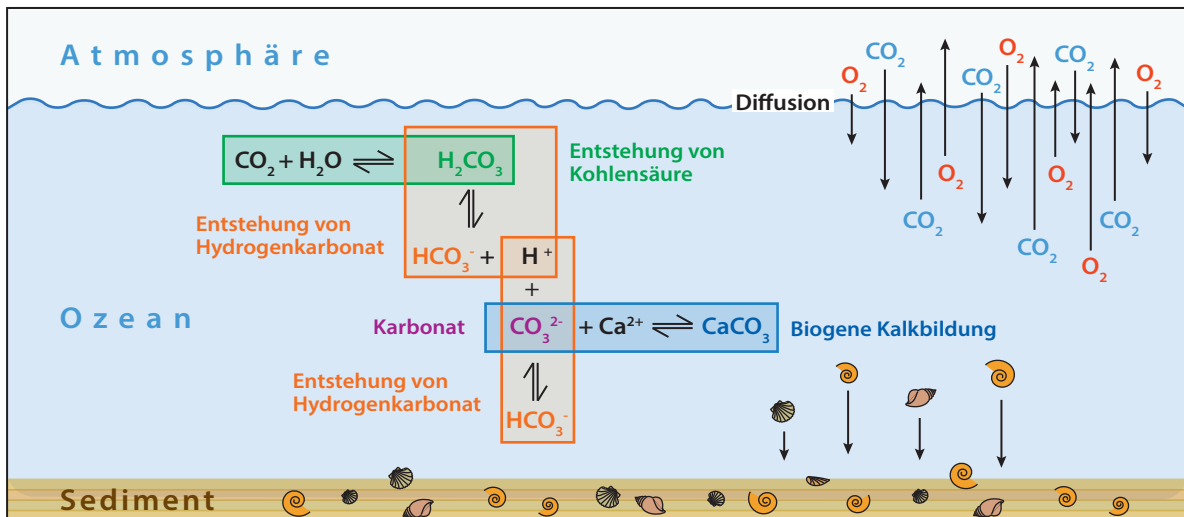


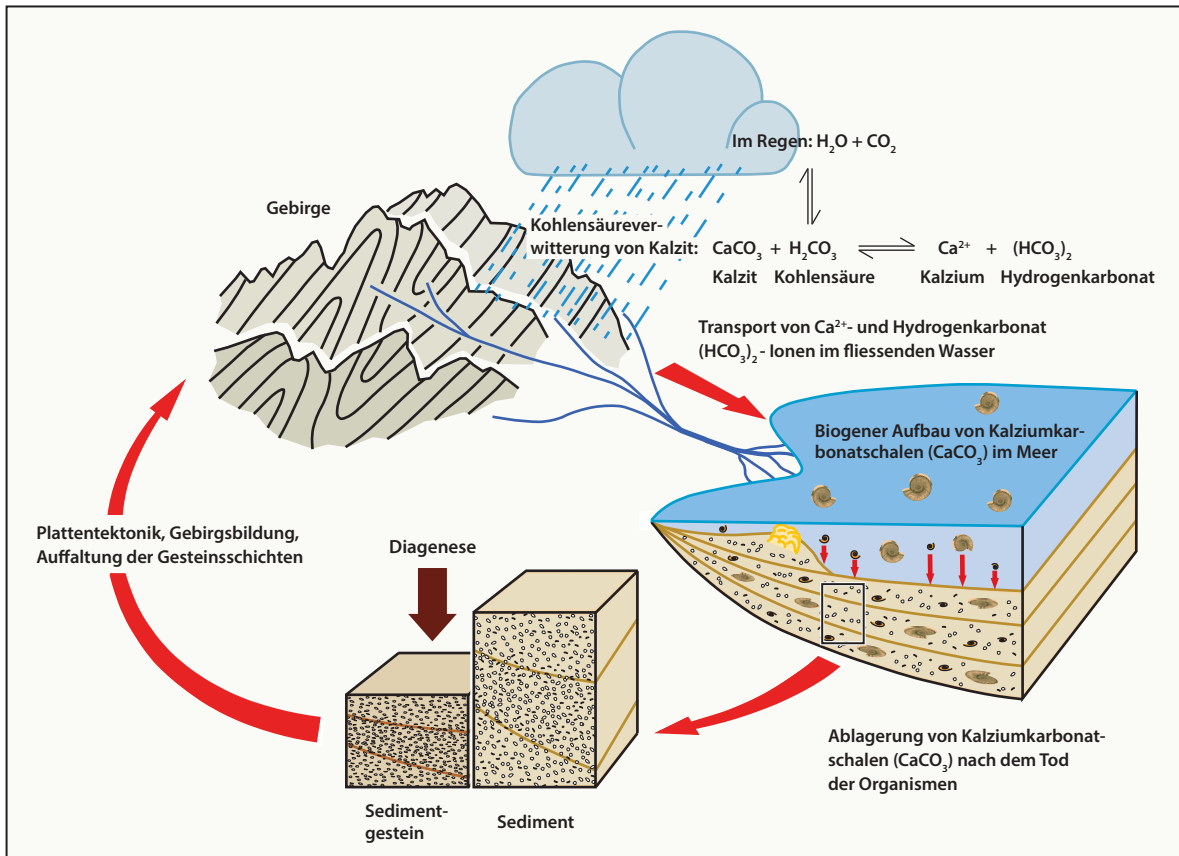
Abb. 2: Chemische Reaktionen, die durch den CO<sub>2</sub>-Eintrag im Meerwasser ausgelöst werden

- Bakterien und pflanzliche Lebensformen entziehen der Atmosphäre durch Photosynthese CO<sub>2</sub>, seien dies Wasserpflanzen wie Algen oder Landpflanzen wie Bäume. Jedes Mal, wenn im Lauf der Erdgeschichte neue pflanzliche Lebensformen entstanden, sank in der Folge der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre (Abb. 1). Dabei wurden auch grosse Mengen organischen Materials als Sedimente wie Kohle oder Erdöl/Erdgas in der Erdkruste eingelagert und der Atmosphäre entzogen.
- Vulkane hingegen stossen riesige Mengen an CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre aus. Ausbrüche grosser Vulkansysteme (sogenannte Spalteneruptionen, bei welchen die Erdkruste über viele hundert Kilometer aufriss) führten im Lauf der Erdgeschichte zu dramatischen Anstiegen des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre. Gegenwärtig emittieren die Vulkane ein «moderates» gesamt-CO<sub>2</sub>-Volumen von 180 bis 440 Megatonnen (Millionen Tonnen) pro Jahr (zum Vergleich: der anthropogene CO<sub>2</sub>-Ausstoss erreichte in den letzten Jahren rund 36 Gigatonnen (Millarden Tonnen) pro Jahr).
- Auch das Auseinanderreissen und neu Zusammenfügen von Kontinenten durch plattentektonische Prozesse führt zu einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Ersteres durch vermehrten Vulkanismus an den «Rissen» (Rifts), letzteres durch chemische Reaktionen im Gestein, wenn eine Platte unter eine andere geschoben (subduziert) und dabei erhitzt wird.
- Auch die Grösse der Kontinente spielt eine Rolle: Schliessen sich «normalgrosse» Kontinente durch plattentektonische Prozesse zu Superkontinenten zusammen wie Rhodinia (vor ca. 1'000 bis 900 Mio. J.) oder Pangaea (vor 380 bis 160 Mio. J.), wird das Klima durch zunehmende Kontinentalität (Abstand zum Ozean) immer trockener. Brechen die Superkontinente jedoch zu kleineren Gebilden auseinander (was eher der heute zu beobachtenden Tendenz entspricht), wird das Klima feuchter, wodurch die Verwitterung von Gestein zunimmt. Verwittern kalziumhaltige Minerale wie Kalzit (Hauptbestandteil von Kalk) oder Feldspat, entstehen durch Einwirkung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O (in Form von Kohlensäure: H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) Kalzium- und Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)-Ionen, die ins Meerwasser ausgespült werden, wo sie sich durch biogene Prozesse zu Kalk verbinden, der absinkt und im Sediment eingelagert wird (Abb. 2, 3). Dadurch wird der Atmosphäre dauerhaft sehr viel CO<sub>2</sub> entzogen.

### Frühzeit der Erde

Die Erde ist etwa 4.6 Milliarden Jahre alt. Aus astronomischen Beobachtungen ist bekannt, dass die Strahlungsintensität der Sterne im Lauf ihres Lebenszyklus zunimmt. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Sonneneinstrahlung zu Beginn der Erdentwicklung um ca. 1/3 schwächer war als heute, sodass die Atmosphäre weniger stark durch die Sonne aufgewärmt werden konnte.

Die Informationen, welche die Gesteine über die Frühzeit der Erde hergeben, sind spärlich. Man stellt sich das Geschehen etwa so vor: Zu Beginn betrug die Temperatur an der Erdoberfläche über 1'200°C, da die Erde glutflüssig war. Zu dieser Zeit gab es weder einen Ozean noch eine Atmosphäre. In der Folge kühlte die Erde ab. Dabei erhärtete die oberste Schicht zu einer dünnen Erdkruste. Gase traten aus der Erde aus und bildeten eine Ur-Atmosphäre, die hauptsächlich aus **Kohlenstoffdioxid** (CO<sub>2</sub>) und **Wasserdampf** be-



**Abb. 3:** Kalzium (Ca)-Kreislauf am Beispiel von Kalzit, dem Hauptbestandteil von Kalkstein (Kalziumkarbonat). Eingelagert zunächst im Sediment und nach der Diagenese in festem Sedimentgestein bleibt das  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre für Zeiträume von vielen Millionen Jahren entzogen.

stand. Möglicherweise gelangte ein Teil dieser Gase auch durch Kometen auf die Erde, die beim Einschlag verdampften. Der Wasserdampf kondensierte allmählich zu **Niederschlägen**, wodurch der **Ozean** entstand. Der Gehalt an  $\text{CO}_2$  war damals vermutlich bis zu 100'000 mal grösser als heute, die Atmosphäre 80 bis 100 mal dichter und so warm wie die heutige Atmosphäre der Venus, wo die Temperatur in Bodennähe bis zu 500°C beträgt (beim heute auf der Erde herrschenden Atmosphärendruck könnte bei 500°C kein Ozean durch Niederschlag entstehen).

Der neu gebildete Ozean konnte in der Folge durch Diffusion von der Atmosphäre ins Wasser riesige Mengen an  $\text{CO}_2$  aufnehmen, wodurch sich der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre schon früh in der Erdgeschichte massiv verringerte. Ab ca. 3.5 Milliarden Jahren vor heute begannen auch **erste Bakterien** der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  zu entziehen. Jedes Mal, wenn sich in der Folge besonders viele Lebewesen entwickelten, die der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  entzogen, kühlte sich das Klima ab. Zwischen 2.5 und 2.3 Milliarden Jahren vermehrten sich Bakterien besonders heftig. Ab 2.3 Milliarden Jahre entwickelten sich zusätzlich **tierische und pflanzliche Einzeller**, ab 1.5 Milliarden Jahre schliesslich entstanden **mehrzellige Organismen**, vor allem Algen, welche der Atmosphäre grosse Mengen von  $\text{CO}_2$  entzogen und im Gegenzug Sauerstoff produzierten. Die Zeit von 900 bis 600 Millionen Jahre vor heute war denn auch von einer extremen Vereisung der Erde geprägt. Diese war vermutlich so heftig, dass die Wissenschaft von der «Schneeballerde» spricht.

Ab 570 Millionen Jahren vor heute war der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre soweit gesunken, dass er nur noch 15 bis 20 mal höher war als heute. Dafür war der Sauerstoffgehalt gestiegen und ermöglichte nun auch **tierisches Leben**, das sich in den Ozeanen auf vielfältige Weise entwickelte. Die Entwicklung der **Landpflanzen** ab 460 Millionen Jahre senkte den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre auf nur noch das 10-fache des heutigen Wertes (Abb. 1).

Der Buntsandstein wurde in einer Zeit abgelagert, als  $\text{CO}_2$ -Gehalt und Temperatur der Atmosphäre aufgrund erhöhter vulkanischer Aktivität durch das beginnende Auseinanderbrechen des Urkontinentes Pangaea einen Zwischenanstieg innerhalb des allgemeinen Senkungstrends verzeichneten (Abb. 1).