

## Ergänzung 2 zu Posten 3

Das Klima – eine Geschichte des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes

Erinnern Sie sich, was Sie an Posten 3 (Kinderbrunnen) über die tropenähnlichen Klimabedingungen in Mitteleuropa während der Ablagerung des Solothurner Kalksteins erfahren haben?

Hier erfahren Sie ...

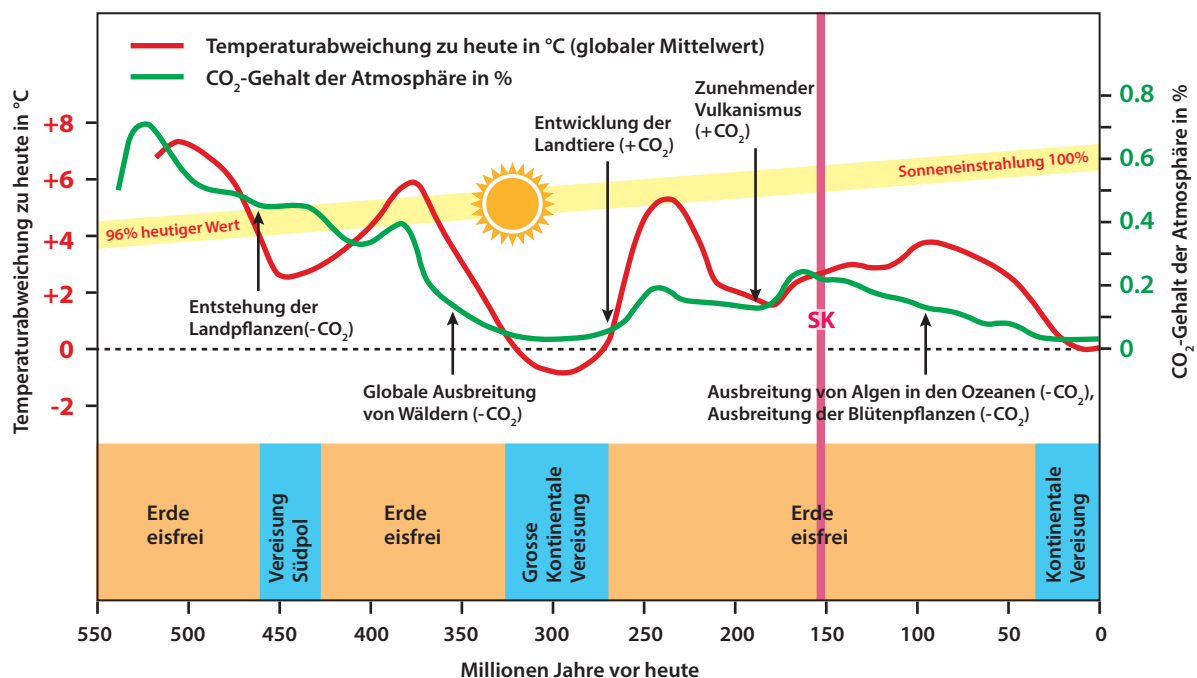
- wie wechselhaft die Temperaturen auf der Erde im Lauf der Erdgeschichte waren,
- dass wir in einem Zeitalter der Eiszeiten leben,
- wie Klimaveränderungen die Menschheit beeinflussen und
- weshalb der heutige Klimawandel aussergewöhnlich ist.

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

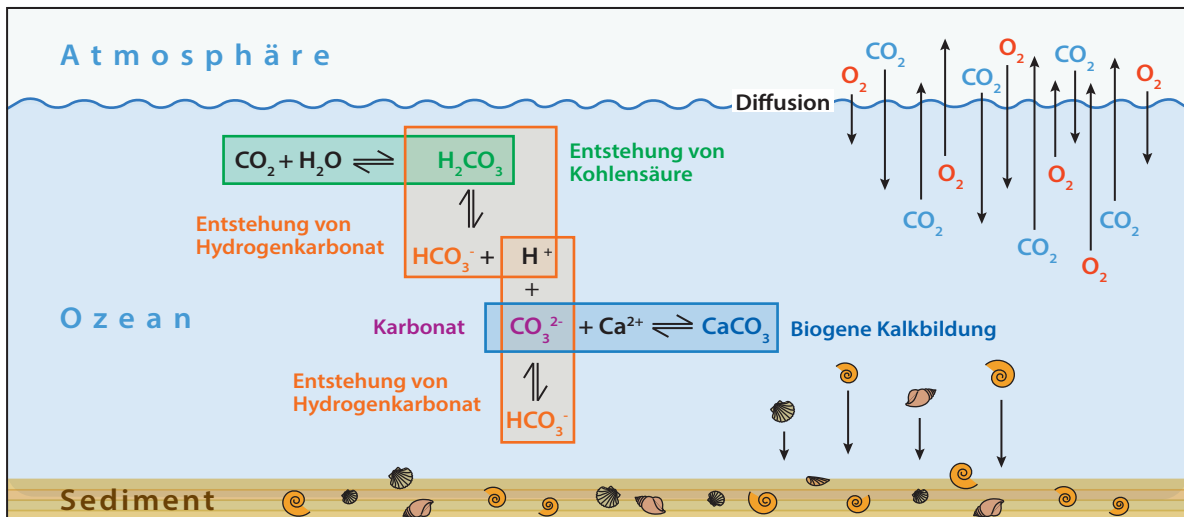
Die Temperatur der Atmosphäre hing im Laufe der Erdgeschichte und hängt auch heute massgeblich von deren CO<sub>2</sub>-Gehalt ab: Je höher der CO<sub>2</sub>-Gehalt, desto höher ist auch die Temperatur der Atmosphäre (Abb. 1). Die heutigen, als angenehm empfundenen, moderaten Temperaturen auf der Erde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



**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. Roter Balken «SK»: Ablagerung des Solothurner Kalksteins. 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.

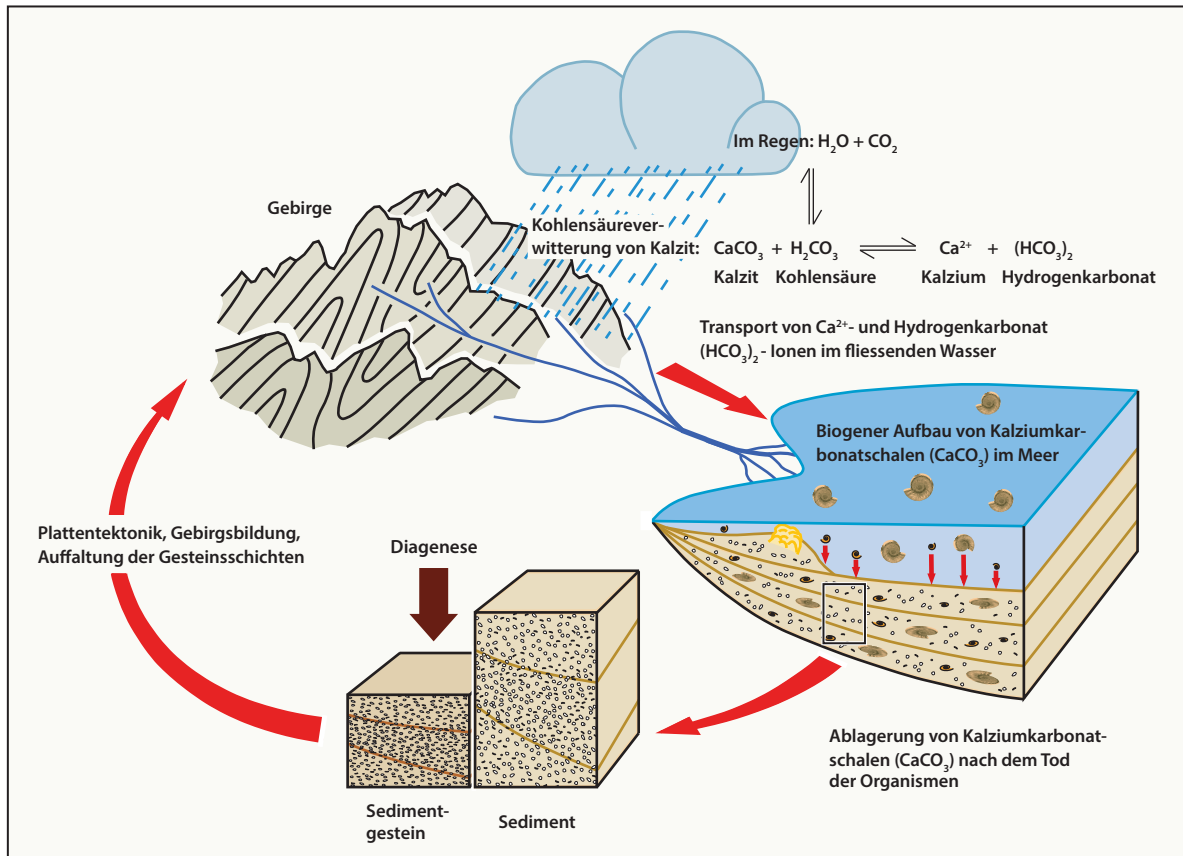
sen sinken nach deren Tod zu Boden und bilden Sedimentschichten, in welchen das CO<sub>2</sub> für Jahrtausende gespeichert bleibt und damit der Atmosphäre entzogen wird.

- 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 in 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 (Milliarden 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 Hydrogenkarbonat (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



**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.

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** ( $\text{CO}_2$ ) und **Wasserdampf** bestand. 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  $500^\circ\text{C}$  beträgt.

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 Solothurner Kalkstein 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).

### Das aktuelle Eiszeitalter

Über die jüngere Erdgeschichte weiss man schon sehr viel. Vor ca. 35 Millionen Jahren begann die letzte grosse Vereisungsperiode, die bis heute anhält (Abb. 1). Deren letzte Phase, die bis heute andauernde **Quartäre Eiszeit** begann vor 2.58 Mio. Jahren und zeichnet sich durch mindestens 20 Zyklen sich abwechselnder Kalt- und Warmzeiten aus, sogenannte **Glaziale** und **Interglaziale** (Abb. 4). Dabei stiessen die Alpengletscher mehrmals bis weit ins Schweizer Mittelland vor (Abb. 5 - 7), schmolzen zwischenzeitlich aber auch immer wieder bis in hohe Lagen der Alpen zurück (Abb. 8, 9). Während der Kaltzeiten nahmen die Inlandeisschilde und die Gebirgsgletscher global erheblich an Umfang und Volumen zu und bedeckten schliesslich etwa 32 % des Festlands der Erde. Die Gletscher Skandinaviens stiessen dabei von Norden her bis nach Deutschland vor. Gegenwärtig sind nur etwa 10 % der Kontinentalfläche von Gletschern bedeckt.

Das Ende der letzten grossen Vereisung liegt erst 10'000 Jahre zurück. Da wir uns auch heute noch innerhalb der Quartären Eiszeit befinden – allerdings in einem Interglazial – ist es sehr wahrscheinlich, dass in der fernen Zukunft, vermutlich in etwa 30'000 Jahren, eine erneute Abkühlung einsetzen wird, die wieder zu einer weitgehenden Vergletscherung der Schweiz führen könnte. Dies vermutlich aber nur, falls der menschliche Einfluss auf das Klima nicht dazu führt, dass dieses völlig ausser Kontrolle gerät.

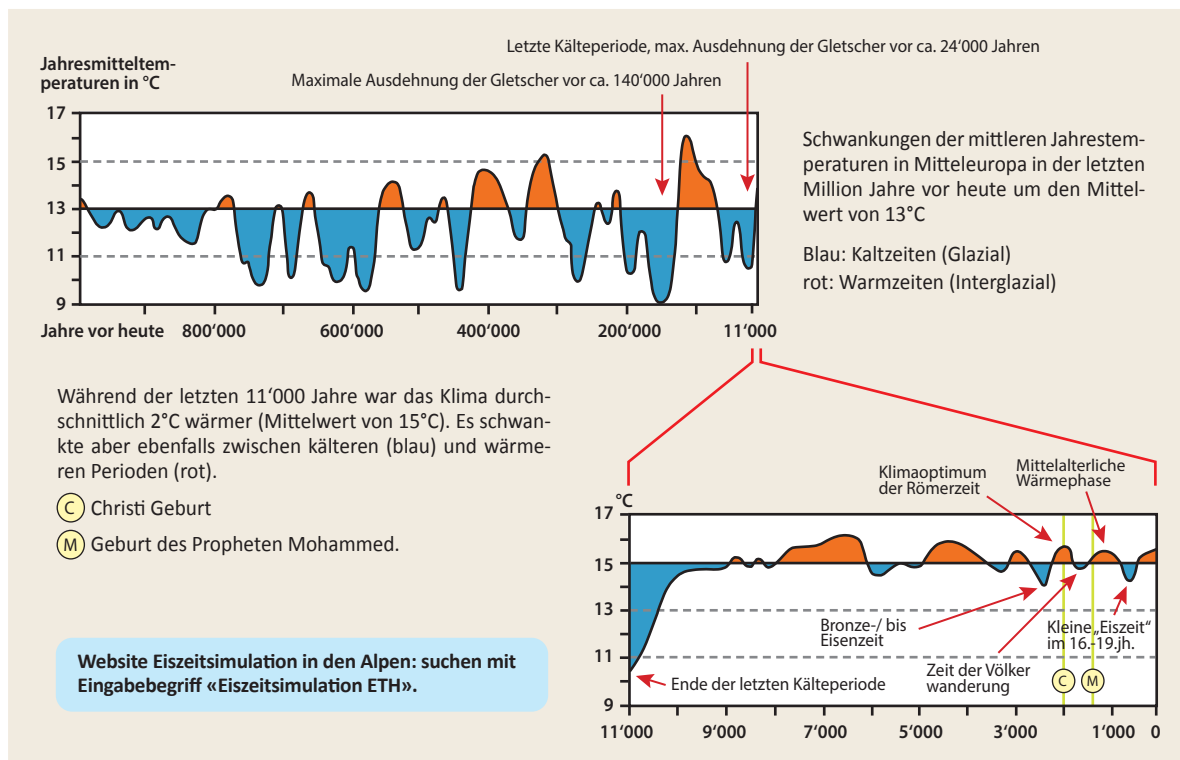


Abb. 4: Schwankungen der mittleren Jahrestemperaturen im Verlauf der letzten Million Jahre



Abb. 5: Die eiszeitliche Alpenverglatscherung kann man sich ähnlich vorstellen wie die heutige Vergletscherung der Antarktis (Amundsen-Gletscher), wobei nur die höchsten Berge als sog. Nunataks aus dem Eis ragen..



Abb. 6: Das Schweizer Mittelland könnte ausgesehen haben, wie sich das Ernst Hodel (1927, Museum Gletschergarten in Luzern) vorstellte. Die Gletscherarme waren von Mittelmoränen begrenzt. Der Pfeil zeigt die heutige Lage von Luzern, P ist der Pilatus.





**Abb. 7:** In Kanada gibt es Gletscher, die erst vor Kurzem noch weit über den Rand des Gebirges ins flache Land vorgestossen waren (Axel Heiberg Island, 2008).

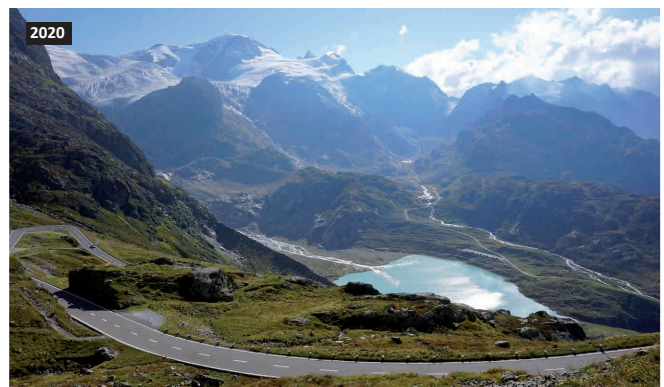
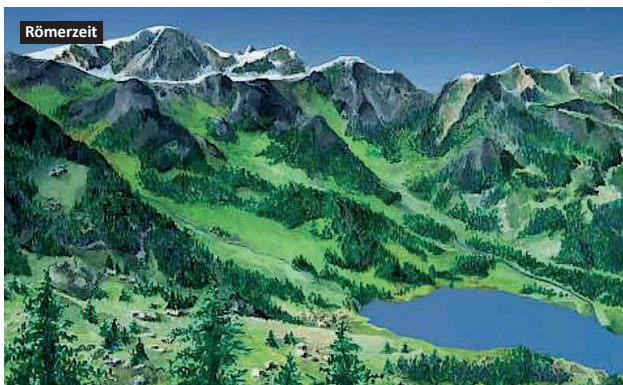


**Abb. 8:** Als die grossen Gletscher zu Beginn einer Wärmeperiode abzuschnmelzen begannen, könnte dies in der Region von Schaffhausen etwa so ausgesehen haben. Im Vordergrund befindet sich der Rhein, Blickrichtung Südwesten, im Hintergrund befinden sich die Alpen.

### Der Mensch und das Klima

Die letzte Million Jahre war geprägt von heftigen Klimaschwankungen. Seit etwa 9'000 Jahren befinden wir uns in einer Warmzeit (Abb. 4), welche die Entwicklung der menschlichen Kultur in Europa erst ermöglichte. Doch auch in dieser Phase gab es markante Schwankungen, die das Wohlergehen der Menschen beeinflussten. So fällt z. B. die Blütezeit der römischen Kultur mit einer klimatisch wärmeren Periode zusammen (Abb. 4, 9). Die danach im 4. Jh. einsetzende Völkerwanderung in Europa hingegen nahm ihren Anfang während einer kühleren Zeit (Abb. 4). Es ist denkbar, dass die Menschen vor allem in Nord- und Osteuropa durch Kälte, Nässe und Missernten aus ihren angestammten Siedlungsgebieten vertrieben wurden und sich in der Hoffnung auf bessere Lebensbedingungen auf die oft tausende Kilometer weite Suche nach einer neuen Heimat machten. So gelangten z. B. die Wandalen aus dem Gebiet des heutigen Polen über Frankreich und Spanien bis nach Nordafrika und siedelten in der Region des heutigen Tunesien.

Während der darauf folgenden mittelalterlichen Wärmeperiode waren die Alpen weitgehend eisfrei, was den Handel über das Gebirge hinweg begünstigte. In dieser Phase erreichten die Wikinger Grönland. Das



**Abb. 9:** Entwicklung des Steingletschers am Sustenpass: Nach der Vorstellung des Klimaforschers Christian Schlüchter könnte der Sustenpass in der Römerzeit bis weit hinauf bewaldet gewesen sein, möglicherweise gab es dort auf 2200 Meter ü. M. sogar eine Alpsiedlung. Um 1900 lag das Tal unter dem Steingletscher. 1960 war der Gletscher schon wieder so weit abgeschmolzen, dass erneut ein See entstand. 2020 war der Gletscher von diesem Standort aus nicht mehr zu sehen.



heisst übersetzt «Grünland» und deutet darauf hin, dass die Vegetation zumindest im Süden der Insel damals weitaus üppiger gewesen sein muss als heute.

Besonders einschneidend dürfte die sogenannte **Kleine Eiszeit**<sup>1</sup> gewesen sein, die im 16. Jahrhundert begann und bis Mitte des 19. Jahrhunderts immer wieder für kalte Sommer und Missernten sorgte. In Holland wurde damals auf den Grachten (Kanälen) eisgelaufen, obwohl das Klima dort sonst eher mild ist, selbst in Venedig soll das Meer im Winter gefroren gewesen sein, sodass Eislauf möglich war. Auch die Gletscher in den Alpen begannen vorzustossen und zerstörten Wälder und Kulturland. Dadurch verbreiteten sie bei den Bergbewohnern Angst vor dem Verlust ihrer Existenzgrundlagen. Die Kirche hielt Fürbitten und sogar Pilgerreisen nach Rom ab, um Gott zu bitten, den Vorstoss des Eises zu stoppen.

Missernten führten zu Hungersnöten und zu steigenden Lebensmittelpreisen. Dadurch wurde die Bevölkerung unzufrieden. Da man damals die Zusammenhänge in der Natur nicht verstand, wurden Schuldige gesucht für die Klimaverschlechterung. Diese fand man in Minderheiten wie z. B. den Juden, welche in der Folge unterdrückt und verfolgt wurden. Es fanden auch Verbrennungen angeblicher Hexen statt, die man beschuldigte, das Wetter verhext zu haben.

Im Jahr 1816 fiel im Sommer selbst im Schweizer Mittelland oft Schnee statt Regen und es gab kaum Sonnentage. Man spricht deshalb vom **Jahr ohne Sommer**. Ein Jahr zuvor war der indonesische Vulkan Tambora ausgebrochen und hatte sehr viel Asche, Aerosole und Gase in die Atmosphäre geschleudert. Dadurch wurde die Sonneneinstrahlung so stark absorbiert und reflektiert, dass sich die Erdoberfläche nicht mehr genügend aufwärmen konnte. Dies verstärkte die kleine Eiszeit noch zusätzlich und führte zu so grosser Not, dass viele Europäer – darunter auch Tausende Schweizer – ihre Rettung in der Auswanderung nach Amerika oder Australien suchten (siehe „Jahr ohne Sommer, Ergänzung zu Posten 11).

Die Kleine Eiszeit inspirierte diverse Landschaftsmaler und Fotografen zu aussergewöhnlichen Bildern, die heute wichtige Zeugen für Leben und Landschaft jener Zeit sind (Abb. 10-13).



**Abb. 10:** Winterlicher Eislauf in Holland im Jahr 1565, von Pieter Bruegel dem Älteren



**Abb. 11:** Vorstoss des unteren Grindelwaldgletschers (Kanton Bern) um 1770, von Caspar Wolf



**Abb. 12:** Der Vorstoss des Aletschgletschers (Kanton Wallis) 1840 bis 1860 zerstörte grosse Teile eines Waldes, der die Bevölkerung mit Bau- und Brennholz versorgte.



**Abb. 13:** Vorstoss des Rhonegletschers (Kanton Wallis) um ca. 1850, Fotografie

<sup>1</sup> Volkstümlicher, wissenschaftlich aber nicht korrekter Begriff. „Eiszeit“ ist der übergeordnete Begriff für die gesamte, seit 2.58 Mio. Jahren andauernde kalte Periode.



Die wilden, spektakulären Gletscher zogen nicht nur Maler und Fotografen in ihren Bann, sondern ab dem 19. Jahrhundert auch eine wachsende Schicht wohlhabender Bürger, die sich Reisen in die Alpen leisten konnten. Damit setzte der Tourismus ein und es wurden erste grosse Hotels gebaut, die sogar an abgelegenen Orten einen erstaunlichen Luxus zu bieten vermochten (Abb. 14).

**Abb. 14:** Hotel «Glacier du Rhône» am Rhonegletscher um 1900, gebaut für wohlhabende Reisende, die das «Spektakel» des Gletschers erleben wollten. Heute ist der Rhonegletscher von diesem Standort aus nicht mehr zu sehen.

### Aktuelle Klimaveränderung

Das Klima veränderte sich in den letzten Jahren spürbar. In der Schweiz gelten die Jahre 2022 bis 2024 vorerst als wärmste Jahre seit Beginn der systematischen Temperaturmessungen 1864. Doch mittlerweile zweifelt niemand mehr daran, dass es in der Zukunft noch wärmere und noch trockenere Jahre geben wird.

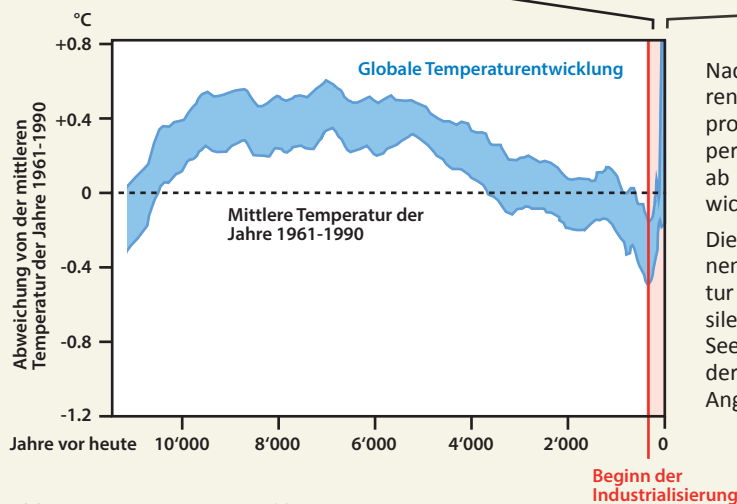
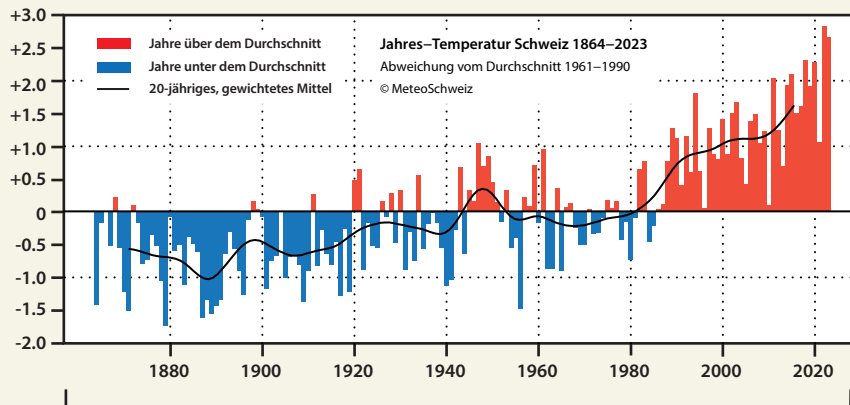
Wie die Erdgeschichte und im Speziellen das aktuelle, Quartäre Eiszeitalter zeigen, sind Klimaveränderungen selbst innert kurzer Zeiträume von ein paar hundert Jahren nichts Aussergewöhnliches. Diese wurden im Lauf der Erdgeschichte unter anderem durch Veränderungen im  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre ausgelöst, die wiederum durch viele verschiedene Prozesse angestossen worden waren. Im aktuellen Eiszeitalter spielten bisher vor allem geringfügige Veränderungen in der Erdumlaufbahn und in der Lage der Erdachse eine Rolle (Milanković-Zyklen), die dazu führten, dass sich vor allem polnahe Regionen abkühlten. Dadurch entstanden dort grosse Gletscher, die den Abkühlungstrend weiter verstärkten. Es wäre deshalb naheliegend, auch für die aktuelle Klimaveränderung eine natürliche Ursache anzunehmen. Doch diesmal spricht sehr viel dafür, dass der Mensch Auslöser der Veränderungen ist:

- Seit 6'000 Jahren vor heute bis vor kurzem nahmen die Jahresdurchschnittstemperaturen sehr langsam, aber kontinuierlich ab, mit ca.  $0.1$  bis  $0.15^\circ\text{C}$  pro 1'000 Jahre. Man spricht deshalb von einem **langfristig abnehmenden Temperaturtrend**. Ginge die Temperatur weiter in diesem Ausmass zurück, würde in ca. 30'000 Jahren die nächste Kaltzeit einsetzen. Ein plötzlicher Temperaturanstieg um bis zu  $2^\circ\text{C}$  innert kurzer Zeit (Abb. 15), wie er in den letzten 150 Jahren durch Messungen dokumentiert wurde, passt deshalb nicht zu diesem abnehmenden Temperaturtrend.
- In der Vergangenheit stiegen die Temperaturen nach Kaltzeiten jeweils im Durchschnitt um 4 bis  $5^\circ\text{C}$  in 10'000 Jahren. Wenn sich der aktuelle Temperaturanstieg weiter fortsetzt, wird eine Zunahme um 4 bis  $5^\circ\text{C}$  in nur hundert Jahren erfolgen. Das ist **hundert mal schneller** und kann mit natürlichen Ursachen nicht erklärt werden.
- Die Konzentration von **Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ )** in der Atmosphäre ist in den letzten 250 Jahren massiv gestiegen, nachdem sie sich während tausenden von Jahren zuvor kaum verändert hatte. Der Beginn des Anstiegs fällt mit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert zusammen (Abb. 16). Durch die Verbrennung von Kohle und später von Erdöl und Erdgas zum Betrieb von Maschinen und zur Gewinnung von Energie wurden seither riesige Mengen  $\text{CO}_2$  freigesetzt, das sich in der Atmosphäre ansammelt. Je mehr  $\text{CO}_2$  sich in der Atmosphäre befindet, desto stärker erwärmt sie sich. Dieser **Treibhauseffekt** löste einen **Temperaturanstieg** aus, der sich ab 1900 rasant intensivierte.
- In keiner Warmzeit während der letzten Million Jahre stieg der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre derart stark an. Er erreichte früher Maximalwerte um  $0.03\%$ , heute liegt er bereits bei über  $0.04\%$  (Abb. 16).
- Die Forschung ist in der Lage, mit Sicherheit nachzuweisen, dass ein Teil des erhöhten Kohlenstoffdioxidgehaltes ( $\text{CO}_2$ ) der Atmosphäre das Ergebnis des Verbrennens von Kohle, Erdöl und Erdgas ist.
- Durch die Industrialisierung der Landwirtschaft und vor allem durch intensive Viehhaltung stieg der Gehalt an Methan ( $\text{CH}_4$ ) in der Atmosphäre um  $47\%$  an, jener von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) um  $58\%$ . Methan ist ein 25 mal stärkeres Treibhausgas als  $\text{CO}_2$ , Lachgas wirkt sogar 300 mal stärker auf die Erderwärmung ein.

Die aktuelle Klimaveränderung lässt nicht nur die Durchschnittstemperaturen ansteigen, sie führt auch zu extremen Wetterlagen wie langen Trockenperioden, heftigen Stürmen und aussergewöhnlich grossen Regengängen in kurzer Zeit, die Überschwemmungen verursachen. In den Gebirgen weltweit sowie in Grön-

Seit 1864 werden in der Schweiz die Lufttemperaturen gemessen. Die Grafik zeigt die Abweichungen der durchschnittlichen Jahrestemperaturen von der Durchschnittstemperatur zwischen 1961 und 1990.

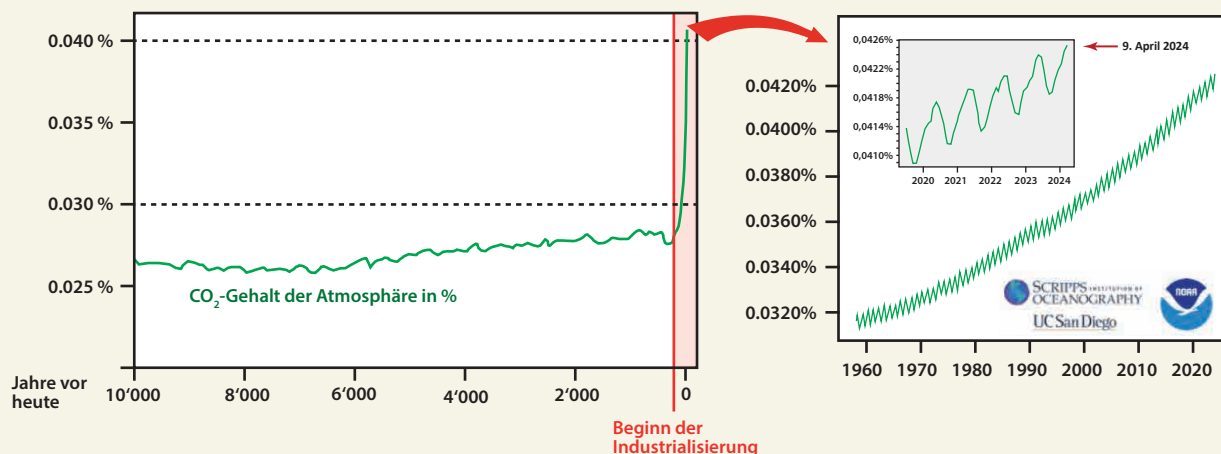
Blaue Balken sind kalte Jahre, rote Balken sind warme Jahre. Seit 1940 überwiegen warme Jahre, seit 1986 gab es keine kalten Jahre mehr.



Nach der letzten Kälteperiode stiegen die Temperaturen, bis sie vor etwa 6'000 Jahren wieder mit ca. 0.15°C pro Jahrtausend zu sinken begannen. Die abrupte Temperaturzunahme seit dem Beginn der Industrialisierung ab Mitte des 18. Jahrhunderts passt nicht in diese Entwicklung.

Die Temperaturangaben aus Zeiten vor ca. 1700, in denen noch keine direkten Messungen der Lufttemperatur existieren, basieren auf komplexen Methoden (fossile Baumstämme und Pflanzenreste, Ablagerungen in Seen und Meeren sowie Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis). Deswegen sind auch keine ganz genauen Angaben möglich, sondern nur ein Band (blau).

Abb. 15: Temperaturentwicklung



CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre in den vergangenen 10'000 Jahren in Prozent. Seit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt ununterbrochen und aussergewöhnlich stark an.

Die Werte entstammen Luftproben aus Blasen, welche im Gletschereis Grönlands und der Antarktis eingeschlossen sind (Abb. 20-23). Seit 1958 wird der CO<sub>2</sub>-Gehalt in einer Messstation auf Hawaii direkt in der Atmosphäre gemessen.

**Aktueller CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre:**  
[www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)

Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre von Januar 1958 bis April 2024, gemessen auf Hawaii.

Die jährlichen Schwankungen (Zacken in der Kurve) entstehen durch die Wirkung des Pflanzenwachstums. Wachsen Pflanzen im Sommer, lagern sie grosse Mengen an CO<sub>2</sub> in ihren Blüten und Blättern ein, die sie damit der Atmosphäre entziehen. Dadurch nimmt deren CO<sub>2</sub>-Gehalt kurzzeitig um ca. 0.0006% ab. Sterben Blüten und Blätter im Herbst ab, gelangt das CO<sub>2</sub> zurück in die Atmosphäre.

Abb. 16: Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre



land und der Antarktis schmelzen Gletscher mit Rekordgeschwindigkeit (Abb. 17 - 19). Die Eisbedeckung des Nordpolarmeeres ist heute noch halb so dick und ihre Ausdehnung viel geringer als früher. In den vergletscherten Gebirgen entspringen viele Flüsse, die im Sommer vor allem wegen des Schmelzwassers der Gletscher überhaupt Wasser führen. Fällt dieses Wasser weg, wird der Landwirtschaft Wasser fehlen und es werden Millionen von Menschen in ihrer Existenz bedroht sein, insbesondere in Asien und Südamerika. Steigen die Temperaturen weiter an, geht man davon aus, dass die Alpen im Jahr 2100 weitgehend eisfrei sein werden. Trotz ihrer vielen Flüsse wird auch die Schweiz von zunehmender Trockenheit betroffen sein. Einerseits werden die sommerlichen Regenfälle abnehmen, andererseits werden die Flüsse im Sommer weniger Wasser führen oder teils ganz austrocknen, wenn die Gletscher verschwunden sein werden.



**Abb. 17:** Der Morteratschgletscher in Graubünden ist im Jahr 1911 bereits 400 m kürzer als bei seinem Höchststand 1856. Das Ende der Kleinen Eiszeit ist erst 60 Jahre her, die Gletscherzunge ist für das mittlerweile wieder wärmere Klima viel zu lang und dick. Der Gletscher muss zuerst wieder auf eine «normale» Grösse zurück schrumpfen.



**Abb. 18:** Der Morteratschgletscher im Jahr 2000. 1970 hatte der Gletscher eine Grösse, die etwa dem «normalen» Klima in den Alpen entspricht (gelbe Linie), so wie es ohne den aussergewöhnlichen Temperaturanstieg durch den Klimawandel wäre. Von 1970 bis 2000 ist der Gletscher viel dünner und über 400 m kürzer geworden.



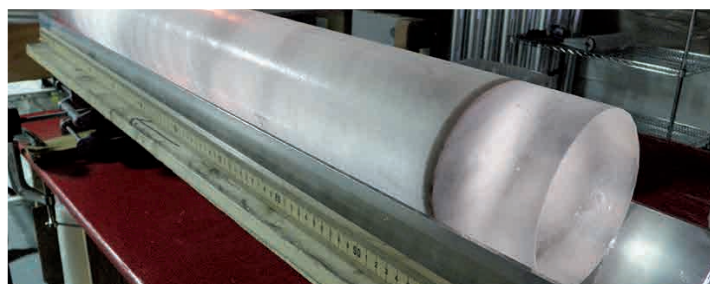
**Abb. 19:** Der Morteratschgletscher im Jahr 2015. In nur 15 Jahren ist das Eisvolumen ausserordentlich stark geschrumpft (Längenverlust von 650 m). Dies ist ausschliesslich das Ergebnis des Temperaturanstiegs durch den aktuellen Klimawandel. Die gelbe Linie markiert den Gletscherstand im Jahr 2023, mit einem weiteren Verlust von ca. 370 m.

Seit 1864 werden in der Schweiz Lufttemperaturen gemessen. Dabei zeigt sich, dass die jährlichen Durchschnittstemperaturen seit ca. 1940 immer häufiger über dem langjährigen Mittelwert liegen. Seit 1986 gab es sogar nur noch überdurchschnittlich warme Jahre (Abb. 15).

Der Gehalt an Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) der Atmosphäre wird seit 1958 in einer Messstation auf Hawaii gemessen (Abb. 16). Das ergibt eine eher kurze Messreihe von nur ca. 60 Jahren. Für die Zeit davor wird der Gehalt an Kohlenstoffdioxid in Luftblasen gemessen, die im Gletschereis Grönlands und der Antarktis eingeschlossen sind. Dafür werden Bohrkern aus Tiefen von über 3'000 Metern aus dem Eis gebohrt (Abb. 20 - 23). In der Antarktis konnte auf diese Weise Eis mit einem Alter von 900'000 Jahren untersucht werden.



**Abb. 20:** Hohlbohrer zum Erbohren von Eisbohrkernen



**Abb. 21:** Eisbohrkern



**Abb. 22:** Jede Schicht im Eisbohrkern beinhaltet das Eis eines Jahres



**Abb. 23:** In Eis eingeschlossene Luftblasen