

## Ergänzung 2 zu Posten 3

## Die Erdgeschichte als Abfolge von Warm- und Kaltzeiten

Erinnere dich, was du an Posten 3 (Münster) über das warme, trockene Klima zur Zeit der Ablagerung des Buntsandsteins erfahren hast.

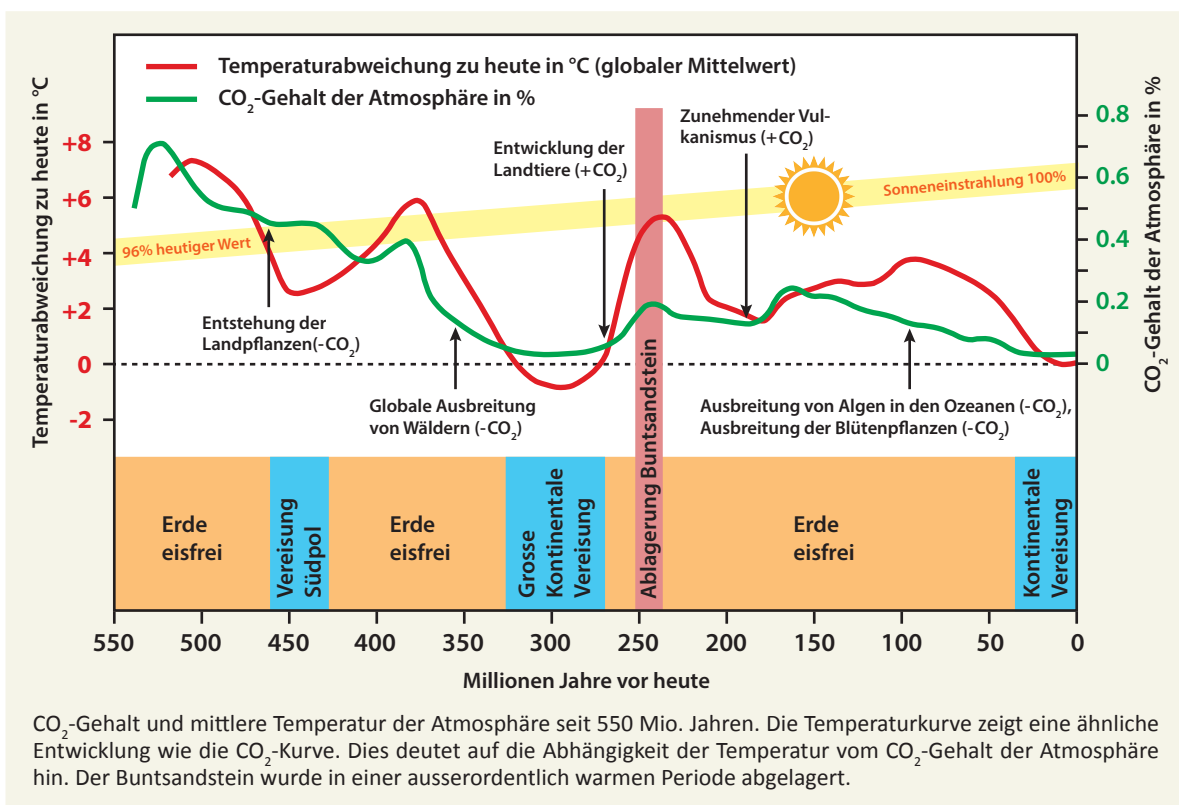
Hier erfährst du ...

- 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.

## Frühzeit der Erde

Die Erde ist etwa 4.6 Milliarden Jahre alt. 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 1200°C, da die Erde glutflüssig war. Zu dieser Zeit gab es weder Ozeane 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 jedoch noch ganz anders zusammengesetzt war als die heutige Atmosphäre. Sie bestand hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserdampf. Der Wasserdampf kondensierte allmählich und bildete Ozeane. Der Gehalt an CO<sub>2</sub> war damals vermutlich bis zu 100'000 mal grösser als heute, die Atmosphäre 80-100 mal dichter und so warm wie die heutige Atmosphäre der Venus, wo die Temperatur in Bodennähe bis zu 500°C beträgt.

Sobald sich eine Erdkruste und Ozeane gebildet hatten, wurden durch komplizierte chemische Prozesse riesige Mengen von CO<sub>2</sub> im Ozeanwasser und in den Gesteinen gespeichert. Dadurch verringerte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre massiv. Dies ist wichtig, denn die Temperatur der Atmosphäre hängt 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. Die heutigen, angenehmen Temperaturen auf der Erde sind demnach das Ergebnis einer drasti-



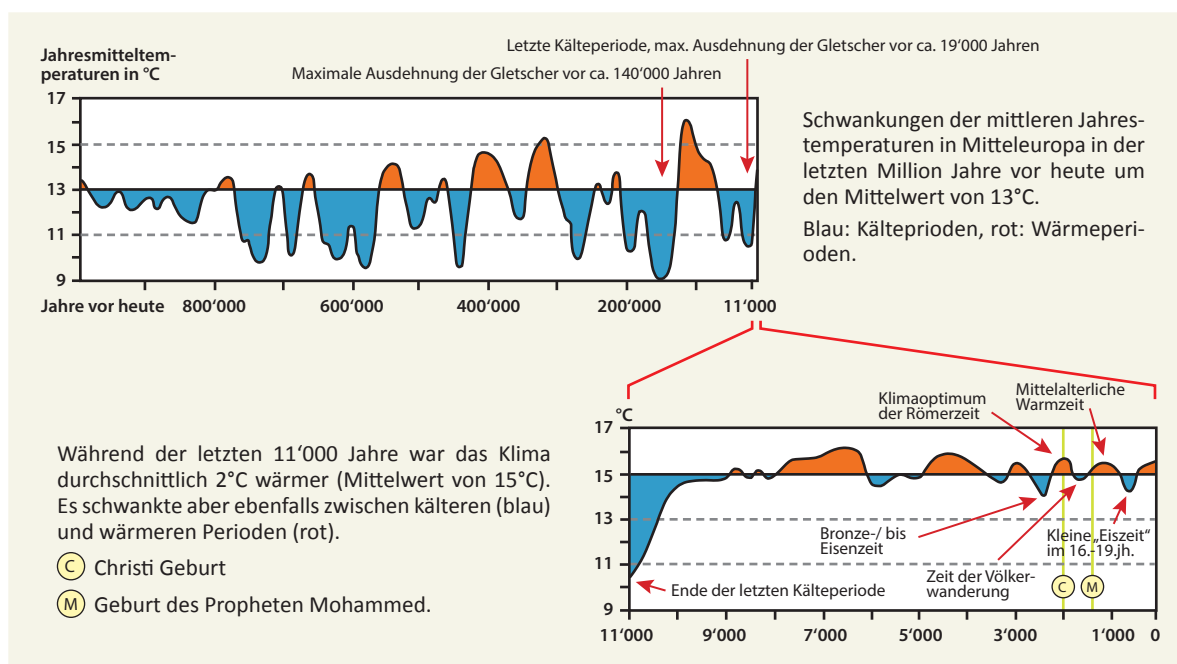
schen Verringerung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes in der Atmosphäre im Lauf der Erdgeschichte. Bei der Verringerung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts spielten höchstwahrscheinlich Lebewesen eine zentrale Rolle: Viele Lebewesen entziehen der Atmosphäre  $\text{CO}_2$ , das sie zum eigenen Aufbau benötigen. Jedes Mal, wenn neue pflanzliche Lebensformen entstanden, sank in der Folge der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre (Abb. S. 1). Vulkane hingegen stossen riesige Mengen an  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre aus. Zu Beginn der Erdentwicklung war die Sonneneinstrahlung um ca. 1/3 schwächer als heute, sodass die Atmosphäre weniger stark durch die Sonne aufgewärmt werden konnte.  $\text{CO}_2$ - und Temperaturwerte lassen sich durch aufwändige Laboranalysen und Berechnungen aus Sedimentgesteinen abschätzen.

### Das aktuelle Zeitalter der Eiszeiten

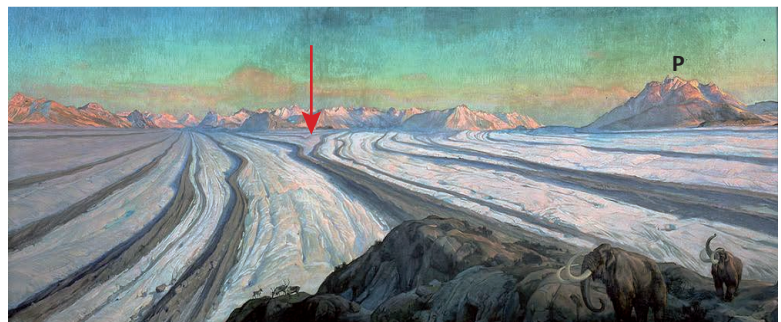
Über die jüngere Erdgeschichte hingegen weiss man sehr viel. Vor ca. 35 Millionen Jahren begann die letzte grosse Vereisungsperiode, die bis heute anhält (Abb. S. 1). Dies hat z.B. dazu geführt, dass die Ozeane heute weltweit 12 bis 14°C kälter sind als vor 70 Millionen Jahren. Zunächst betraf die Vereisung nur die Region des Südpols, seit 3 Millionen Jahren ist auch die Nordpolarregion dauerhaft vereist.

Die letzte Million Jahre der aktuellen Vereisungsperiode ist geprägt von mehreren Vorstössen der Alpengletscher bis weit ins schweizer Mittelland. Die Gletscher Skandinaviens stiessen von Norden her sogar bis nach Deutschland vor. Das Klima war jedoch nicht konstant kalt. Zwischen den Kälteperioden gab es lang anhaltende Phasen mit wärmerem Klima (Abb. unten), die vergleichbar sind mit dem Klima heute, so dass die Gletscher auch immer wieder bis weit in die Alpentäler hinein zurückschmolzen.

Das Ende der letzten grossen Vereisung liegt erst 10'000 Jahre zurück. Die Wissenschaft geht davon aus, dass wir uns auch heute noch innerhalb des Zeitalters der Eiszeiten befinden, allerdings in einer wärme-



Die eiszeitliche Alpenvergletscherung kann man sich ähnlich vorstellen wie die heutige Vergletscherung der Antarktis (Amundsen-Gletscher).



Das Schweizer Mittelland könnte ausgesehen haben, wie sich das der Maler dieses Bildes im Museum Gletschergarten in Luzern vorstellte. Der Pfeil zeigt die heutige Lage von Luzern, P ist der Pilatus.





In Kanada gibt es immer noch Gletscher, die weit über den Rand des Gebirges ins flache Land vorstossen (Axel Heiberg Island).

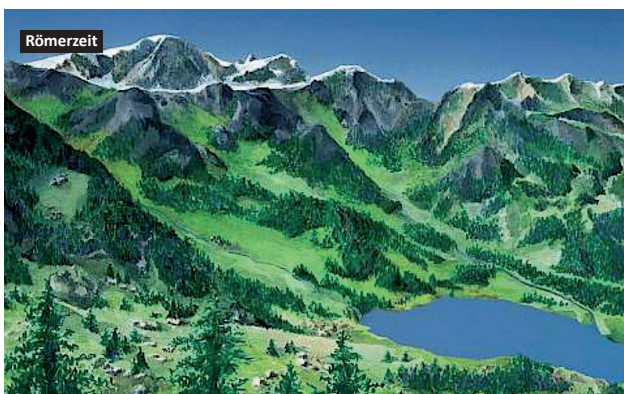


Als die grossen Gletscher zu Beginn einer Wärmeperiode abzuschmelzen begannen, könnte dies in der Region von Schaffhausen etwa so ausgesehen haben. Im Vordergrund befindet sich der Rhein, Blickrichtung Südwesten.

ren Phase. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass in der fernen Zukunft, vermutlich in etwa 30'000 Jahren, eine erneute Abkühlung einsetzen wird, die wieder zu einer Vergletscherung der Schweiz führen könnte.

### Der Mensch und das Klima

Die letzte Million Jahre war geprägt von heftigen Klimaschwankungen. Seit etwa 9'000 Jahren befinden wir uns jedoch in einer wärmeren Phase (Abb. S. 2), welche die Entwicklung der menschlichen Kultur in Europa erst ermöglichte. Doch auch in dieser Phase gab es markante Schwankungen, die das Wohlergehen der Menschen positiv und negativ beeinflussten. So fällt z.B. die Blütezeit der römischen Kultur mit einer Warmzeit zusammen. Die danach im 4. Jh. einsetzende Völkerwanderung in Europa hingegen nahm ihren Anfang während einer Kaltzeit. Es ist denkbar, dass die Menschen vor allem in Nord- und Osteuropa durch Kälte, Nässe und Missernten aus ihren Wohngebieten vertrieben wurden und sich in der Hoffnung auf ein besseres Leben 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 mittelalterlichen Warmzeit waren



Römerzeit



um 1900



um 1960

Steingletscher



2005

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 ein Dorf. Um 1900 lag das Tal unter dem Steingletscher, 1960 und 2005 war der Gletscher schon wieder so weit abgeschmolzen, dass erneut ein See entstand. Heute sieht man den Gletscher von diesem Standort aus nicht mehr.



die Alpen weitgehend eisfrei, was den Handel über das Gebirge hinweg begünstigte. In dieser Phase erreichten die Wikinger Grönland. Das 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** 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 wieder 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 zum Papst 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 im Schweizer Mittelland 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 so viel Asche und Gase in die Atmosphäre geschleudert, dass die Sonneneinstrahlung 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 Ergänzung zu Posten 11).

Die Kleine Eiszeit inspirierte diverse Landschaftsmaler in Holland und in den Alpen zu aussergewöhnlichen Bildern, die heute wichtige Zeugen für Leben und Landschaft jener Zeit sind.



Winterlicher Eislauf in Holland im Jahr 1565, von Pieter Brueghel dem Älteren.



Vorstoss des unteren Grindelwaldgletschers (Kanton Bern) um 1770, von Caspar Wolf.



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



Vorstoss des Rhonegletschers (Kanton Wallis) um ca. 1850, Fotografie.



Die wilden, spektakulären Gletscher zogen nicht nur Maler und Fotografen in ihren Bann, sondern ab dem 19. Jahrhundert auch die wachsende Schicht der wohlhabenden Bürger, welche 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.

Hotel „Gletsch“ 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 Zeitalter der Eiszeiten zeigen, sind Klimaveränderungen nichts Aussergewöhnliches. Diese wurden im Lauf der Erdgeschichte unter anderem durch Veränderungen im  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre ausgelöst. Im aktuellen Zeitalter der Eiszeiten spielen zusätzlich auch geringfügige Veränderungen in der Erdumlaufbahn und in der Lage der Erdachse eine Rolle, die dazu führen, dass sich die Erdoberfläche genügend abkühlt oder aufwärmt, um Gletscher wachsen oder schmelzen zu lassen. Es wäre deshalb naheliegend, auch für die aktuelle Klimaveränderung eine natürliche Ursache anzunehmen. Doch diesmal spricht sehr viel mehr 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 Kälteperiode einsetzen. Ein plötzlicher Temperaturanstieg um bis zu  $2^\circ\text{C}$  innert kurzer Zeit, 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 Kälteperioden 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. Durch die Verbrennung von Kohle und später von Erdöl und Erdgas zum Betrieb von Maschinen und zur Gewinnung von elektrischer 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 sich diese, man spricht dabei vom sogenannten **Treibhauseffekt**.  $\text{CO}_2$  wird deshalb als **Treibhausgas** bezeichnet. Dieser **Treibhauseffekt** löste einen **Temperaturanstieg** aus, der sich ab 1900 rasant intensivierte.
- In keiner Wärmeperiode 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  $0.04\%$ .
- 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 Regenmengen in kurzer Zeit, die Überschwemmungen verursachen. In den Gebirgen weltweit sowie in Grönland schmelzen Gletscher mit Rekordgeschwindigkeit. Die Eisbedeckung des Nordpolarmeeres ist



heute noch halb so dick und ihre Ausdehnung viel geringer. In den vergletscherten Gebirgen entspringen viele Flüsse, welche 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.



Der Morteratschgletscher (Graubünden) im Jahr 1911. 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.



Der Morteratschgletscher im Jahr 2000. Der Gletscher hat erst ca. 1970 wieder eine Grösse erreicht, die dem „normalen“ Klima in den Alpen entspricht, so wie es ohne die Kleine Eiszeit oder den aktuellen, aussergewöhnlichen Temperaturanstieg durch den Klimawandel wäre.



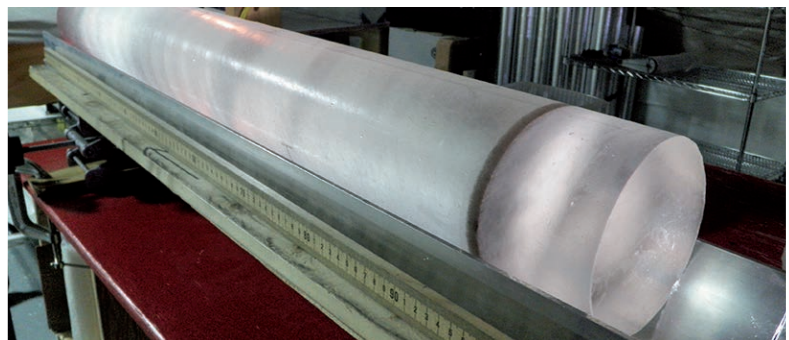
Der Morteratschgletscher im Jahr 2015. In nur 15 Jahren ist der Gletscher ausserordentlich stark (650m) geschrumpft. Dies ist ausschliesslich das Ergebnis des Temperaturanstiegs durch den aktuellen Klimawandel. 2024 lag das Ende der Gletscherzunge weitere 400 m weiter hinten im Tal.

Seit 1756 werden in der Schweiz Lufttemperaturen gemessen. Dabei zeigt sich, dass die jährlichen Durchschnittstemperaturen seit ca. 1900 immer häufiger über dem langjährigen Mittelwert liegen. Seit 1964 gab es sogar **nur** noch überdurchschnittlich warme Jahre (Abbildung S. 6).

Der Gehalt an Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) der Atmosphäre wird seit 1958 in einer Messstation auf Hawaii gemessen. 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 sogenannte Bohrkerne aus Tiefen von über 3'000 Metern aus dem Eis gebohrt. In der Antarktis kann auf diese Weise Eis mit einem Alter von 1'200'000 Jahren untersucht werden.



Hohlbohrer zum Erbohren von Eisbohrkernen.



Eisbohrkern.



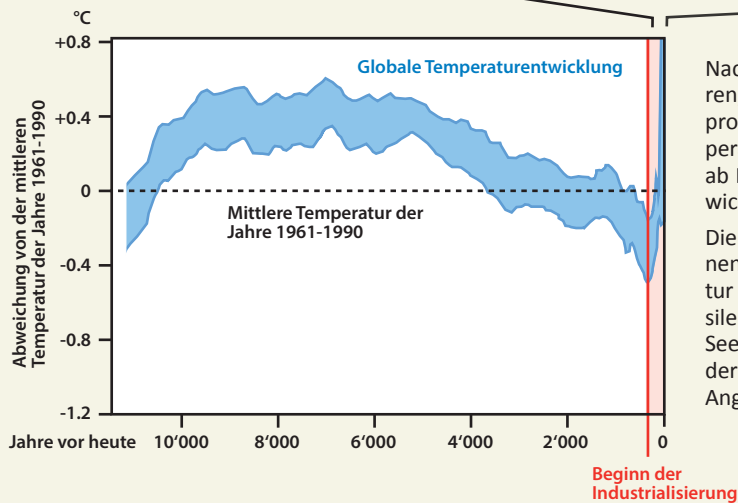
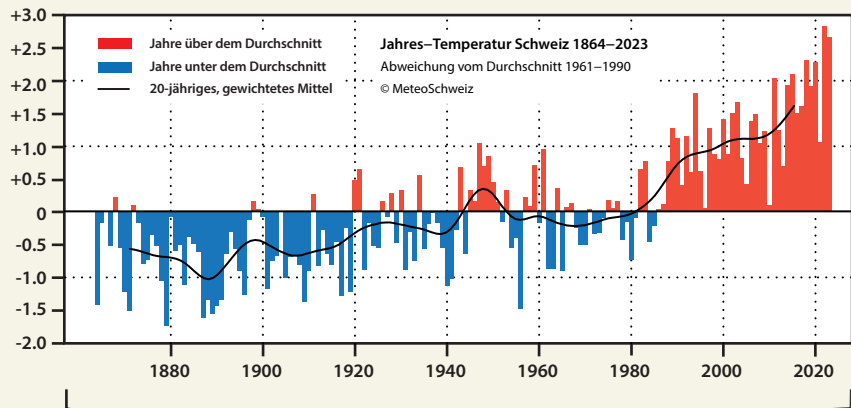
Jede Schicht beinhaltet das Eis eines Jahres.



In Eis eingeschlossene Luftblasen.

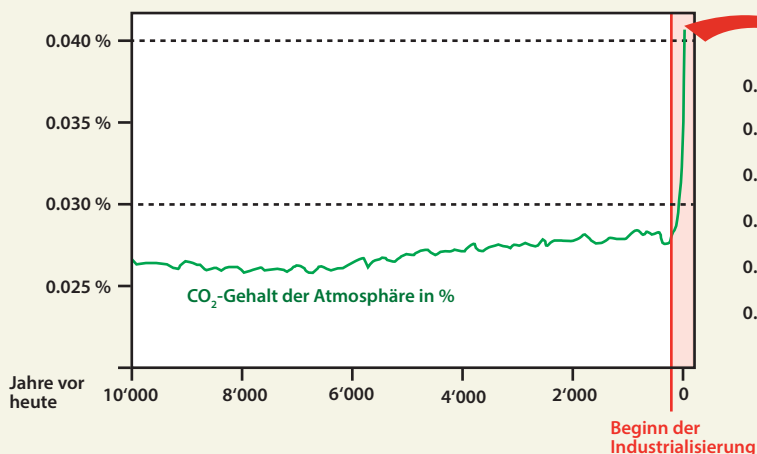
Seit 1864 werden in der Schweiz die Lufttemperaturen gemessen. Die Grafik zeigt die Abweichungen der durchschnittlichen Jahrestemperaturen von der Durchschnittstemperatur zwischen 1961 und 1990.

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.

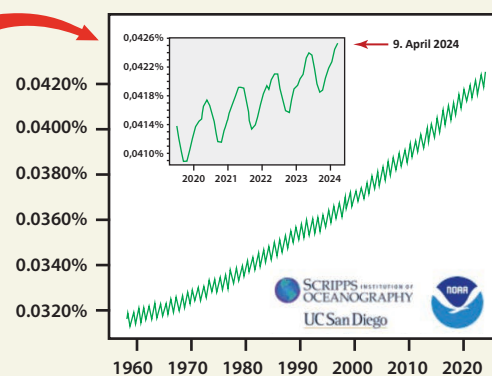
Die Temperaturangaben aus Zeiten vor ca. 1700, in denen noch keine direkten Messungen der Lufttemperatur existieren, basieren auf komplexen Methoden (fossile Baumstämme und Pflanzenreste, Ablagerungen in Seen und Meeren sowie Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis). Deswegen sind auch keine ganz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



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. S. 5). 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.