

Ergänzung 2 zu Posten 1

Landschaftswandel in Warm- und Kaltzeiten

Gletscher prägen das Bild weiter Teile der Alpen noch heute, in der Vergangenheit formten sie auch das Schweizer Mittelland. Sie stiessen dabei unzählige Male vor und schmolzen wieder ab. Schmelzende Gletscher – so wie wir es aktuell erleben – wären also eigentlich kein so ungewöhnliches Szenario, wäre da nicht der menschgemachte Klimawandel, der die Gletscher unerwartet schnell schmelzen lässt.

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**. Dabei stiessen die Alpengletscher mehrmals bis weit ins Schweizer Mittelland vor (Abb. 1, 2, 4), schmolzen aber auch immer wieder bis in hohe Lagen der Alpen zurück (Abb. 5). 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

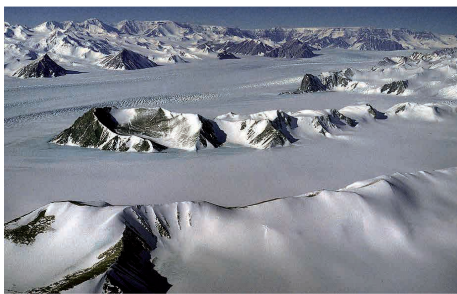


Abb. 1: Die eiszeitliche Alpenvergletscherung kann man sich ähnlich vorstellen wie die heutige Vergletscherung der Antarktis, wobei nur die höchsten Berge als sog. Nunataks aus dem Eis ragen.



Abb. 2: Das Schweizer Mittelland könnte ausgesehen haben, wie sich das Ernst Hodel (1927, Museum Gletschergarten in Luzern) vorstellte. Die Gletscherarme waren von Mittelmoränen begrenzt. Pfeil: heutige Lage von Luzern, P: Pilatus.

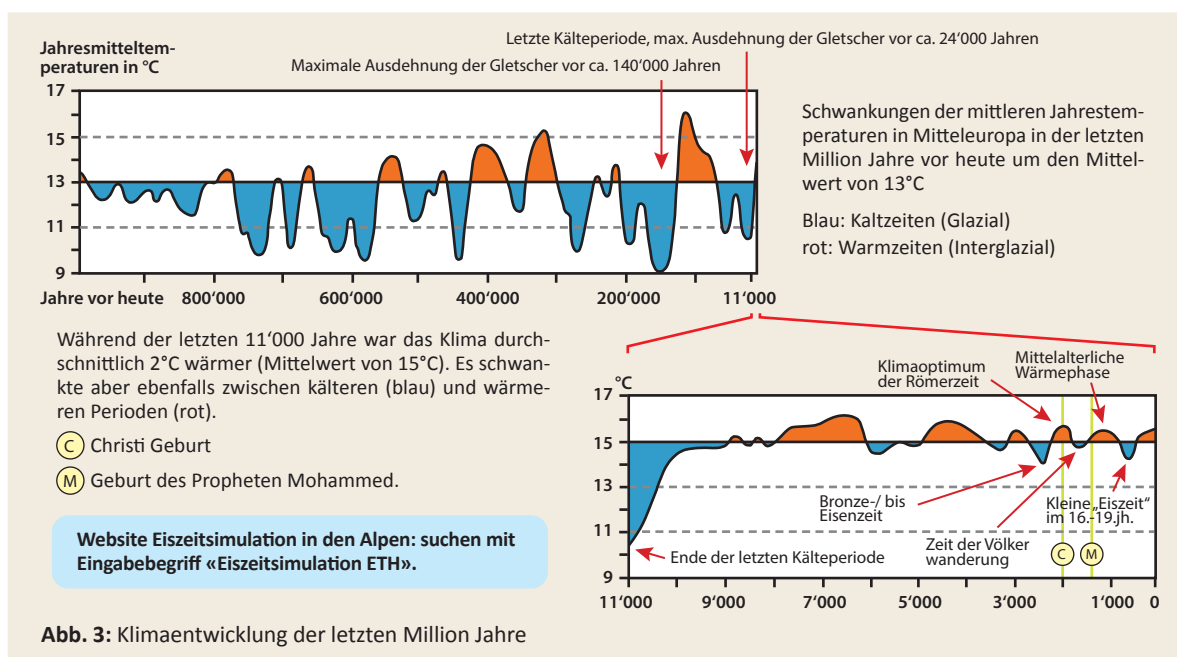




Abb. 4: In Kanada gibt es Gletscher, die erst vor Kurzem noch weit über den Rand des Gebirges ins flache Land vorgestossen waren (Axel Heiberg Island, 2008).



Abb. 5: Als die grossen Gletscher zu Beginn des aktuellen Interglazial abzuschmelzen begannen, könnte dies in der Region von Schaffhausen etwa so ausgesehen haben. Im Vordergrund befindet sich der Rhein, die Blickrichtung ist Südwesten, im Hintergrund befinden sich die Alpen (Museum Allerheiligen Schaffhausen).

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.

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. 3), 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. 3, 6). Die danach im 4. Jh. einsetzende Völkerwanderung in Europa hingegen nahm ihren Anfang während einer kühleren Zeit (Abb. 3). 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 Wärmephase waren die Alpen weitgehend eisfrei, was den Handel über das Gebirge hinweg begünstigte. In dieser Phase erreichten die Wikinger Grönland. Das

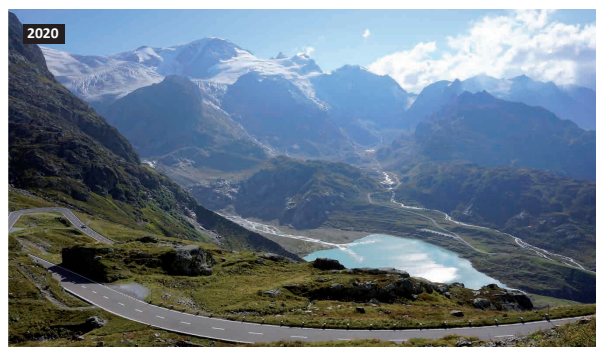
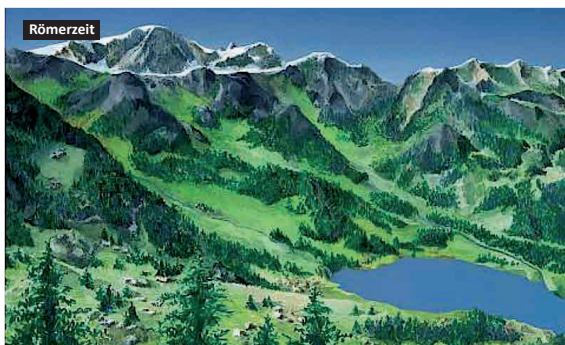


Abb. 6: Entwicklung des Steingletschers am Sustenpass: Nach der Vorstellung des Klimaforschers Christian Schlüchter könnte der Sustenpass in der Römerzeit bis weit hinauf bewaldet gewesen sein, möglicherweise gab es dort auf 2200 Meter ü. M. sogar eine Alpsiedlung. Um 1900 lag das Tal unter dem Steingletscher. 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 musste als heute.

Besonders einschneidend dürfte die sogenannte **Kleine Eiszeit**¹ 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 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 beeinflusst 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 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.

Die Kleine Eiszeit inspirierte diverse Landschaftsmaler und Fotografen zu aussergewöhnlichen Bildern, die heute wichtige Zeugen für Leben und Landschaft jener Zeit sind (Abb. 7-10).



Abb. 7: Winterlicher Eislauf in Holland im Jahr 1565, von Pieter Brueghel dem Älteren



Abb. 8: Vorstoss des unteren Grindelwaldgletschers (Kanton Bern) um 1770, von Caspar Wolf



Abb. 9: Der Vorstoss des Aletschgletschers (Kanton Wallis) 1840 bis 1860 zerstörte grosse Teile eines Waldes, der die Bevölkerung mit Bau- und Brennholz versorgte.



Abb. 10: Vorstoss des Rhonegletschers (Kanton Wallis) um ca. 1850, Fotografie

¹ 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. 11).

Abb. 11: 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.

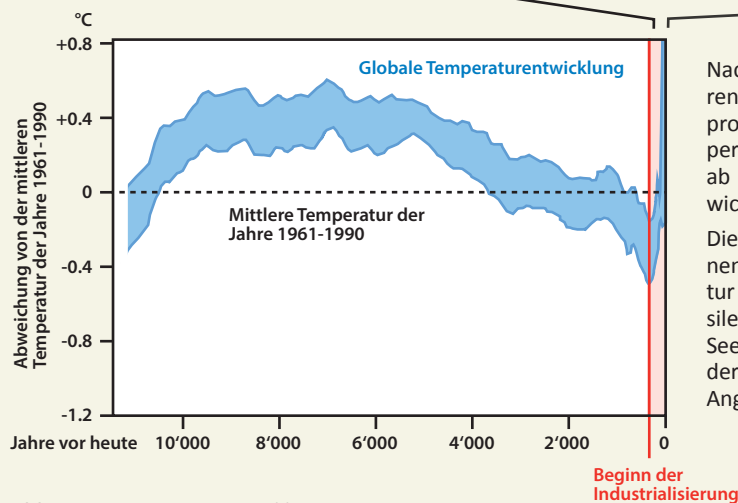
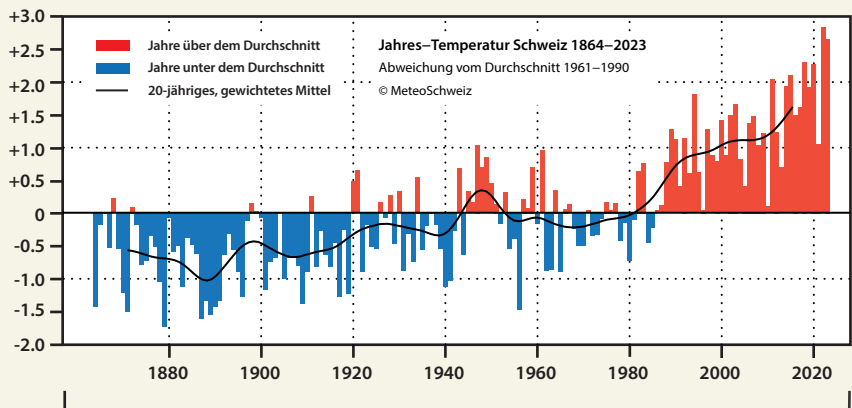
Wie die Erdgeschichte und im Speziellen das aktuelle, Quartäre Eiszeitalter zeigen, sind Klimaveränderungen selbst innert kurzer Zeiträume von ein paar hundert Jahren nichts Aussergewöhnliches. Diese wurden im Lauf der Erdgeschichte unter anderem durch Veränderungen im CO_2 -Gehalt der Atmosphäre ausgelöst, 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°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°C innert kurzer Zeit (Abb. 12), 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°C in 10'000 Jahren an. Wenn sich der aktuelle Temperaturanstieg weiter fortsetzt, wird eine Zunahme um 4 bis 5°C in nur hundert Jahren erfolgen. Das ist **hundert mal schneller** und kann mit natürlichen Ursachen nicht erklärt werden.
- Die Konzentration von **Kohlenstoffdioxid (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. 13). Durch die Verbrennung von Kohle und später von Erdöl und Erdgas zum Betrieb von Maschinen und zur Gewinnung von Energie wurden seither riesige Mengen CO_2 freigesetzt, das sich in der Atmosphäre ansammelt. Je mehr 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 CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre derart stark an. Erreichte er früher Maximalwerte um 0.03% , liegt er heute bereits bei über 0.04% .
- Die Forschung ist in der Lage, mit Sicherheit nachzuweisen, dass ein Teil des erhöhten Kohlenstoffdioxidgehaltes (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 (CH_4) in der Atmosphäre um 47% an, jener von Lachgas (N_2O) um 58% . Methan ist ein 25 mal stärkeres Treibhausgas als 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 Regengmengen in kurzer Zeit, die Überschwemmungen verursachen. In den Gebirgen weltweit sowie in Grün-

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

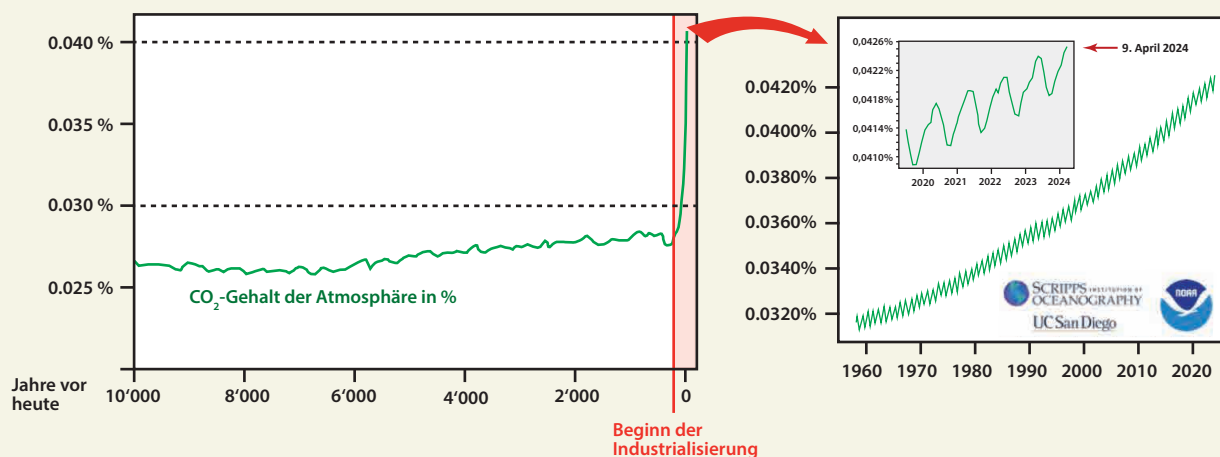
Blaue Balken sind kalte Jahre, rote Balken sind warme Jahre. Seit 1940 überwiegen warme Jahre, seit 1986 gab es keine kalten Jahre mehr.



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. 12: Temperaturentwicklung



CO₂-Gehalt der Atmosphäre in den vergangenen 10'000 Jahren in Prozent. Seit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert steigt der CO₂-Gehalt ununterbrochen und aussergewöhnlich stark an.

Die Werte entstammen Luftproben aus Blasen, welche im Gletschereis Grönlands und der Antarktis eingeschlossen sind (Abb. 17-20). Seit 1958 wird der CO₂-Gehalt in einer Messstation auf Hawaii direkt in der Atmosphäre gemessen.

Aktueller CO₂-Gehalt der Atmosphäre:
www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/

Zunahme des CO₂-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 CO₂ in ihren Blüten und Blättern ein, die sie damit der Atmosphäre entziehen. Dadurch nimmt deren CO₂-Gehalt kurzzeitig um ca. 0.0006% ab. Sterben Blüten und Blätter im Herbst ab, gelangt das CO₂ zurück in die Atmosphäre.

Abb. 13: Entwicklung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre

land und der Antarktis schmelzen Gletscher mit Rekordgeschwindigkeit (Abb. 14 - 16). 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. 14: 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. 15: 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. 16: 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. 12).

Der Gehalt an Kohlenstoffdioxid (CO_2) der Atmosphäre wird seit 1958 in einer Messstation auf Hawaii gemessen (Abb. 13). 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 Bohrkerne aus Tiefen von über 3'000 Metern aus dem Eis gebohrt (Abb. 17 - 20). In der Antarktis konnte auf diese Weise Eis mit einem Alter von 900'000 Jahren untersucht werden.



Abb. 17: Hohlbohrer zum Erbohren von Eisbohrkernen



Abb. 18: Eisbohrkern



Abb. 19: Jede Schicht im Eisbohrkern beinhaltet das Eis eines Jahres.



Abb. 20: In Eis eingeschlossene Luftblasen