

NATÜRLICHE URSACHEN VON KLIMASCHWANKUNGEN

Klima macht Schule: Davos und Parc Ela

Grundlagen



Um präzise zu messen wie die Sonne den derzeitigen Klimawandel beeinflusst, werden Strahlungsmessgeräte aus der ganzen Welt am WRC in Davos kalibriert.

Impressum

Autorin und Autor:

Gian Paul Calonder, Gemeinde Davos
Veronika Stöckli, Bergwelten 21 AG, Davos

Bildquellen:

Wo nicht anders vermerkt stammen die Bilder von der Autorin oder dem Autor.

Das Projekt "Klima macht Schule: Davos und Parc Ela" wurde von der Gemeinde Davos für die Volksschulen in Davos initiiert und später in Zusammenarbeit mit dem Parc Ela auf die Schulen der Naturparkregion erweitert. Das Projekt wurde mit Unterstützung der Volksschule Davos, der Gemeinde Davos, der Meuli-Stiftung, dem Amt für Natur und Umwelt Graubünden, dem Verein Parc Ela und dem Bundesamt für Umwelt BAFU finanziell unterstützt.

Die Inhalte der Module orientieren sich am Davoser Klimafilm. Sie ergänzen das Themendossier zum Klimawandel für den Zyklus 3, welches GLOBE Schweiz für education21 entwickeln liess.

"Klima macht Schule: Davos und Parc Ela" behandelt die folgenden Themen als Module:

- Klima – gestern, heute, morgen
- Natürliche Ursachen von Klimaschwankungen
- Natur im Klimawandel
- Schnee im Klimawandel
- Gletscher im Klimawandel
- Permafrost im Klimawandel
- Wirtschaft und Gesellschaft im Klimawandel
- CO₂-Bilanz und Klimaschutz in der Gemeinde Davos

Jedes dieser Themen umfasst Grundlagen, Unterrichtsmaterialien für Schülerinnen und Schüler sowie methodisch didaktische Erläuterungen. Das vorliegende Dokument erläutert Grundlagen zum Thema **Natürliche Ursachen von Klimaänderungen**.

Davos und Parc Ela, den 1. Dezember 2020

NATÜRLICHE URSACHEN VON KLIMASCHWANKUNGEN

Ein Blick in die Erdgeschichte zeigt, dass es immer wieder extreme Klimaänderungen gab. Zeiten mit tropischem Klima wechselten sich ab mit Eiszeiten. Diese Klimaänderungen können nicht vom Menschen beeinflusst worden sein, weil es davon in diesen Zeiten keine oder nur wenige gab. Sie müssen folglich auf natürliche Ursachen zurückzuführen sein. Doch welche Ursachen sind dies und wie und in welchen Zeiträumen wirken sie?

Das vorliegende Kapitel geht den folgenden Fragen nach:

- Wie beeinflusst die Plattentektonik das Klima?
- Wie beeinflussen die Erdbahnelemente das Klima?
- Wie beeinflussen Vulkanausbrüche das Klima?
- Wie beeinflusst die Sonne das Klima?

Ziel ist, den Schülerinnen und Schülern aufzuzeigen, wie die Natur das Klima beeinflusst.



Diese Lerneinheit wird im Davoser Klimafilm in den Modulen „Fische aus den Bahamas“ und „Die Sonne ist nur Zeugin“ gezeigt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Klimageschichte spiegelt in vielerlei Hinsicht die Geschichte der Erde. Über die Land-Wasser Verteilung, die Vulkanaktivität und über eine veränderte Meereszirkulation haben die Kontinentalverschiebungen das Klima auf der Erde immer wieder verändert. Mit Beginn des Quartärs ist geologisch gesehen Ruhe eingekehrt. Aber auch in dieser Zeit hat sich das Klima verändert.

Als Auslöser für die Klimaveränderungen des Quartärs gelten bestimmte astronomische Konstellationen, die als Milanković-Zyklen bekannt sind. Im Verlauf dieser Zyklen verändern sich die Erdbahnelemente und mit ihnen auch die Sonneneinstrahlung. Die Milanković-Zyklen mit ihrer Periodizität gelten heute als eine Art Schrittmacher für die Eiszeiten. Zusammen mit weiteren Rückkoppelungseffekten, wie Änderung der Albedo oder Änderung der Wind und Meeresströmungen, führten diese in den letzten 600'000 Jahren zum Wechselspiel zwischen den Warm- und Kaltzeiten.

Der Klimawandel in erdgeschichtlich früheren Epochen unterscheidet sich in einem ganz wesentlichen Punkt vom heutigen Klimawandel. Weil es damals noch keine bzw. nur wenige Menschen gab, kommen für die Klimaänderung nur natürliche Ursachen wie das Auseinanderdriften der Kontinentalplatten, Änderungen bei den Erdbahnelementen, grosse Vulkanausbrüche oder Veränderungen bei der Sonnenaktivität in Frage.

Keine dieser natürlichen Ursachen, mit denen der Klimawandel früherer Zeiten gut erklären lässt, taugt um die ungewöhnlich schnelle Erderwärmung der letzten hundert Jahre zu erklären.

WIE BEEINFLUSST DIE PLATTENTEKTONIK DEN KLIMAWANDEL?

DIE BEWEGUNG DER KONTINENTALPLATTEN

Vor rund 300 Mio. Jahren war die Landmasse der Erde - also alle Kontinente - zusammenhängend. Sie formte den Superkontinent Pangäa (vgl. Abbildung 1, links). Das Gebiet von Davos lag damals im Küstenbereich der afrikanischen Platte, ungefähr auf dem Breitengrad der heutigen Bahamas. Es lag somit in einem subtropischen Klima. Statt schnee- und eisbedeckte Gipfel prägten Lagunen und Deltas das Landschaftsbild (vgl. Abbildung 1, rechts). In den küstennahen Gewässern lebten Muscheln, Algen, Knochenfische und kleine Saurier.

Der Superkontinent Pangäa brach vor etwa 200 Mio. Jahren allmählich in einen Nord- und in einen Südkontinent auseinander, Laurasia und Gondwana. Von Osten her schob sich ein Meer namens Tethys dazwischen (vgl. Abbildung 1, links). Das heutige Mittelmeer ist ein Überbleibsel dieses Urmeeres. Davos lag auf Laurasia und reiste auf ihr über Jahrtausende allmählich nordwärts.

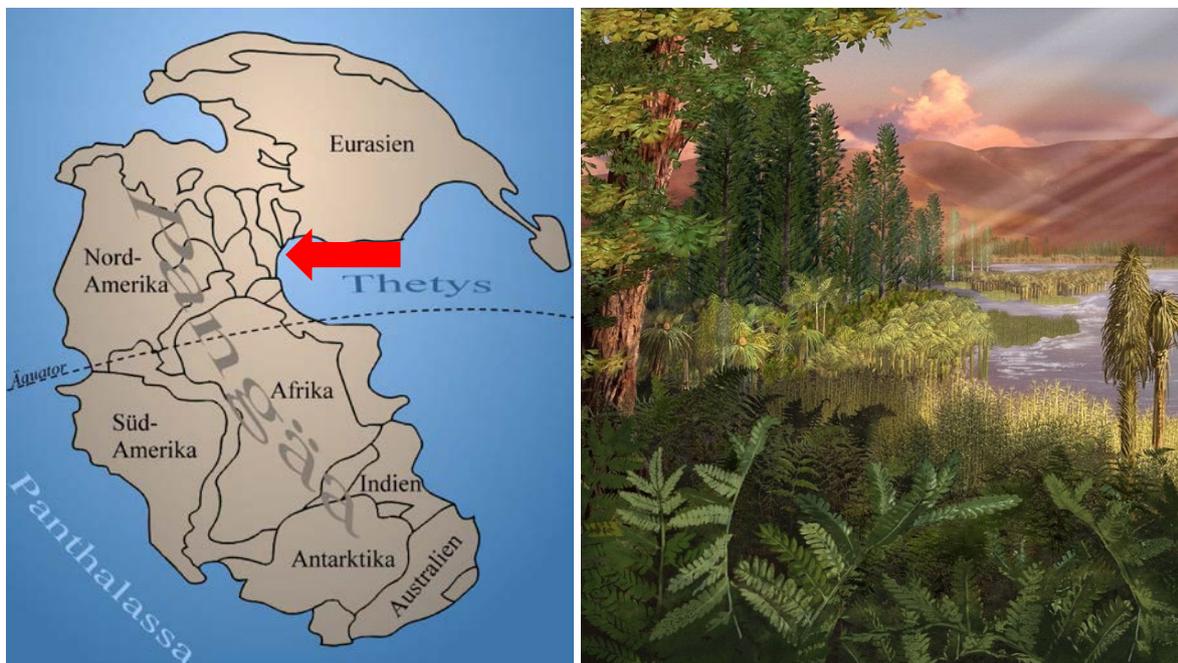


Abbildung 1. Links: Der Superkontinent Pangäa mit dem damaligen Standort von Davos (roter Pfeil) unweit des Äquators. Bildquelle: www.wikipedia.org (Pangäa); Rechts: Landschaft im Trias. Bildquelle: Karen Carr www.dinosaurier-info.de.

Die Lebewesen der ehemaligen Küstenlandschaft wurden auf ihrer mehrere Millionen Jahre dauernden Reise rund 1000 Kilometer nordwärts verschoben, im Sediment abgelagert und versteinert. Im Zuge der Alpenfaltung, die vor rund 100 Mio. Jahren begann, wurde der ehemalige Meeresboden mitsamt den versteinerten Lebewesen an den heutigen Standort in der Region Davos angehoben.

TROPISCHE FISCHE AUS DEM EIS

Vor einigen Jahrzehnten sind Forschende der Universität Zürich am Gletscher Ducan bei Davos auf eine besonders reiche Fossilfundstelle aus jener geologischen Urzeit gestossen. Durch den Rückgang des Eises im Verlauf des Klimawandels sind die Versteinerungen am Gletscher freigelegt worden.



Abbildung 2. Der Ducan Gletscher hat durch seinen Rückzug eine reiche Fossilfundstelle freigelegt.

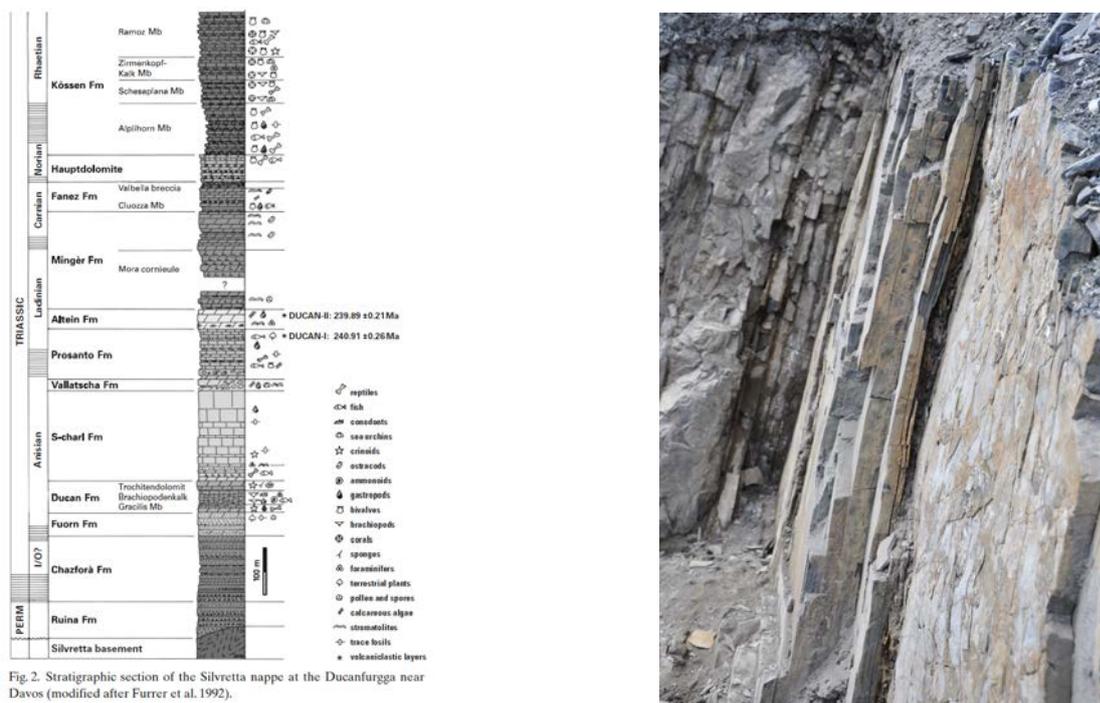


Fig. 2. Stratigraphic section of the Silvretta nappe at the Ducanfurga near Davos (modified after Furrer et al. 1992).

Abbildung 3. Links: Stratigrafie der Silvretta-Decke an der Ducanfurga. Quelle: Furrer et al. 2008. Rechts: Blick in die fossilführenden Gesteinsschichten des Gletscher Ducan, welche auch Prosanto Formation bezeichnet werden.

Dort am Gletscher Ducan werden seit den 1980er Jahren systematisch Versteinerungen gesucht und die gefundenen Arten bestimmt und erforscht. Das Alter der Fossilien kann mit Hilfe der Radioisotopen-Analyse bestimmt werden. Die fossilreichen Schichten am Ducan Gletscher konnten dank dieser Methode auf ein Alter um 241 Mio. Jahre vor heute datiert werden, in die Zeit der Pangäa (vgl. Abbildung 3).

Die Landschaft um den Ducas Gletscher zählt heute dank seiner Fossilien zu den Geotopen der Schweiz. Geotope sind schützenswerte geowissenschaftliche Naturdenkmäler von besonderer geologischer, geomorphologischer oder geoökologischer Bedeutung. Die Stelle ist nicht zuletzt deshalb besonders wertvoll, weil sie Einblick in längst vergangene klimatische Zeiten gewährt und damalige Lebewesen konserviert.

KLIMAWANDEL UND PLATTENTEKTONIK

Wann immer im Verlauf der Erdgeschichte Kontinentalplatten zusammenstossen oder auseinanderbrechen, so hatte dies tiefgreifende Folgen für das Klima. Einerseits waren mit den Platten auch die Vulkane in Bewegung und schleuderten grosse Mengen an Asche, Schwefelgas und Kohlendioxid in die Luft. Über eine derart veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre änderte sich auch das Klima.

Andererseits konnten die neu entstandenen Gebirge oder Landverbindungen bestehende Meeresströmungen unterbrechen oder umleiten, oder neue Meere entstehen lassen, was ebenfalls zu Veränderungen des Klimas führte. Über eine veränderte Land-Wasser Verteilung und über eine veränderte Meereszirkulation, welche zusammen mit der atmosphärischen Zirkulation den Wärmetransport vom Äquator zu den Polen steuert, hat die Verschiebung der Kontinentalplatten das Klima auf der Erde immer wieder verändert.

Die Kontinentalplatten werden sich weiter verschieben, denn sie haben nicht aufgehört sich zu bewegen. Die Plattenbewegungen sind aber derart langsam, dass sie die Klimaentwicklung an einem bestimmten Ort erst in Zeiträumen von Millionen von Jahren beeinflussen. Die heutige Klimaänderung läuft hingegen sehr schnell ab, in Zeiträumen von wenigen Jahrzehnten.

WIE BEEINFLUSSEN DIE ERDBAHNELEMENTE DAS KLIMA?

Vor rund 2,6 Mio. Jahren ist es hinsichtlich geologischer Veränderungen vergleichsweise ruhig geworden. Die Kontinente sind erdgeschichtlich gesehen stehen geblieben und die Zeit des Quartärs begann. Aber auch im Quartär hat sich das Klima verändert. Diese Epoche ist durch eine Abfolge von Kalt- und Warmphasen gekennzeichnet. Die Kaltphasen werden auch als Eiszeiten bezeichnet.

In den letzten 600'000 Jahren gab es in Mitteleuropa vier Eiszeiten. Von der letzten Eiszeit der Würm-Eiszeit sind sowohl in den Bergen als auch im Mittelland noch deutliche Spuren zu sehen. Alle Eiszeiten hatten ihren Ursprung an den Polen (Nord- und Südpol). Während den Kaltzeiten bildeten sich um beide Pole grosse Eisschilde. Auf der Nordhalbkugel reichte das Eis in den Kaltzeiten weit nach Süden. In den Alpen füllte es die Täler bis in grosse Höhen. Während der Eiszeiten breiteten sich die Inlandeisschilde und die Gletscher stark aus und bedeckten bis 32 % der Erdoberfläche. Heute werden nur etwa 10 % der Erdoberflächen von Gletschern bedeckt. Die letzte maximale Ausdehnung des Eises wurde vor etwa 21'000 Jahren erreicht. Die globale Durchschnittstemperatur lag etwa 5 bis 6 °C niedriger als heute. Im Alpenraum lag sie 10 bis 12°C tiefer als heute.

ERDBAHNELEMENTE ALS TREIBER DER EISZEITEN

Die Eiszeiten dauerten deutlich länger, als die Zwischeneiszeiten. In den vergangenen 600'000 Jahren dauerten diese warm-kalt-Zyklen jeweils 100'000 Jahre, wobei die Eiszeiten rund 90'000 Jahre und die Zwischeneiszeiten rund 10'000 Jahre andauerten.

Die Wissenschaften stützen mithilfe neuer Klimamodelle die Vermutung, dass es für die Kalt- und Warmzeiten nicht nur eine Ursache gibt. Es wird angenommen, dass das Auf- und Ab der Temperatur von bestimmten astronomischen Konstellationen beeinflusst wurde. Diese können sich überlagern, gegenseitig verstärken oder abschwächen.

Zu diesen astronomischen Konstellationen zählen die vom serbischen Mathematiker Milutin Milanković entdeckten sogenannten Milanković-Zyklen. Der Wissenschaftler erkannte in den 1920er Jahren eine gewisse Übereinstimmung astronomischer Konstellationen mit den warm-kalt-Zyklen. Diese astronomischen Konstellationen äussern sich in Veränderungen der Erdumlaufbahn sowie der Neigung und Rotation der Erdachse. In der Fachsprache wird die Veränderung der Umlaufbahn als Exzentrizität, die Veränderung des Neigungswinkels der Erdachse als Inklinatation und die Richtungsänderung der Erdrotationsachse als Präzession bezeichnet (vgl. Abbildung 4).

Exzentrizität: Die Umlaufbahn der Erde um die Sonne zeichnet eine Ellipse. Die Exzentrizität gibt an, wie stark die ellipsenförmige Umlaufbahn von einer kreisförmigen Bahn abweicht. In einem Zyklus von rund 100'000 Jahren verändert sich die Umlaufbahn der Erde um die Sonne von einer mehr kreisförmigen zu einer mehr elliptischen Form. Alle 400'000 Jahre erreicht die Abweichung einen Maximal- oder Minimalwert (vgl. Abbildung 4). Ursache dieser Abweichungen sind Störungen der Erdbahn durch die anderen Planeten des Sonnensystems, in erster Linie durch Jupiter und Saturn.

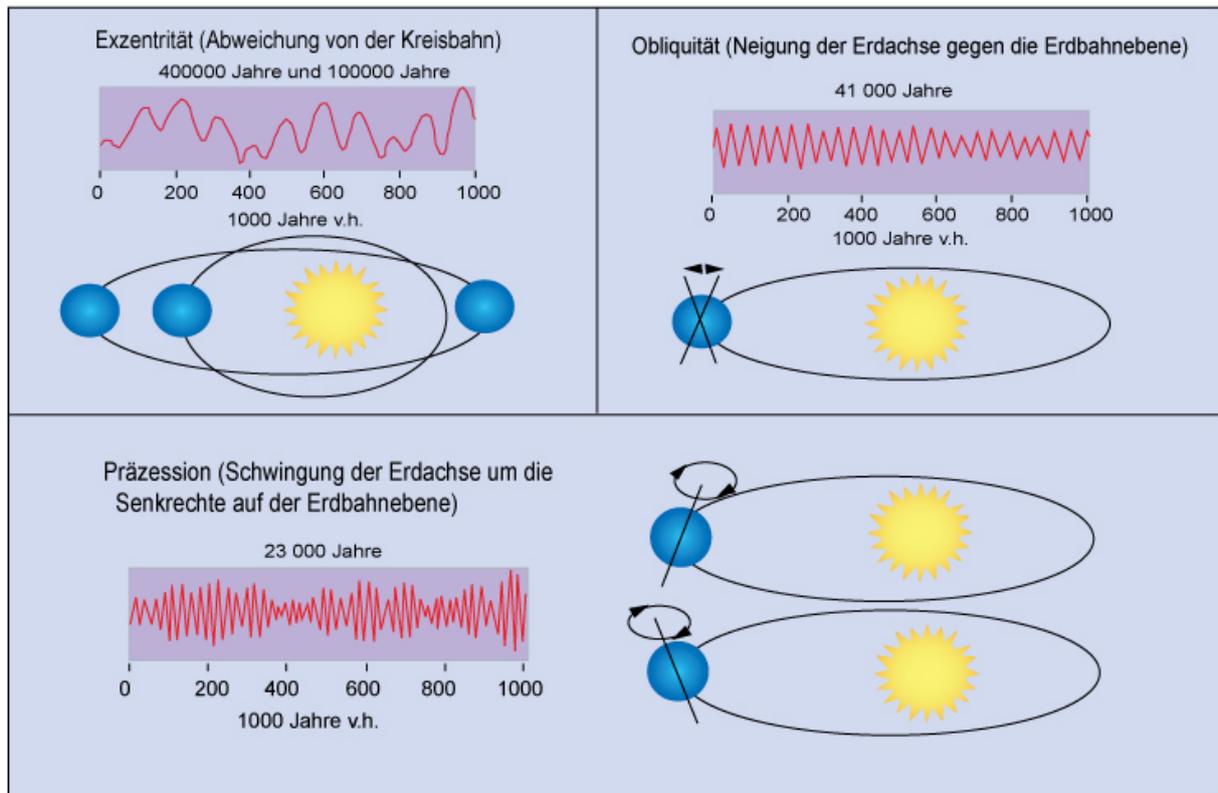


Abbildung 4. Änderungen von Position und Umlaufbahn der Erde mit den jeweiligen Periodendauern. Bildquelle: Bildungsserver, 2016a.

Inklination: Der Neigungswinkel (Neigung der Erdachse gegenüber einer Senkrechten zur Ebene der Umlaufbahn) ändert ebenfalls im Lauf der Zeit. Mit einer Periode von rund 41'000 Jahren pendelt sie zwischen 22,0 und 24,5 Grad (vgl. Abbildung 4). Je nach Schiefe der Erdachse unterscheidet sich das Klima zwischen den Jahreszeiten. Bei grösserer Neigung sind die Winter kälter und die Sommer wärmer, als bei geringerer Achsneigung. Zurzeit beträgt die Achsneigung 23,43 Grad und liegt etwa im Mittel zwischen den Extremwerten.

Präzession: Die Erde ist keine exakte Kugel, sondern weist am Äquator einen Wulst auf („Äquatorwulst“). Dadurch bewirken die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne ein Drehmoment, welches die Erdachse aufzurichten versucht (vgl. Abbildung 4). Die Erdachse beschreibt dadurch eine kegelartige Umlaufbahn. Für einen vollen Kegelumlauf benötigt die Erdachse rund 23'000 Jahre. Dieser Zeitraum wird Zyklus der Präzession genannt. Mit der Präzession wird der Unterschied zwischen den Jahreszeiten verstärkt oder abgeschwächt und Winter und Sommer wechseln ihre Position auf der Erdumlaufbahn.

Die vorgehend beschriebenen Zyklen vereinen sich zu einem Zyklus von 100'000 Jahren. Dieser Zyklus deckt sich gut mit der Periodizität der Eiszeiten wie es Milanković erkannt hat.

RÜCKKOPPLUNGSPROZESSE HABEN MITGEHOLFEN

Die Milanković-Zyklen haben während der vergangenen Million Jahre die Klimaveränderungen auf der Erde beeinflusst. Dies wird von den Klimawissenschaften als unbestritten betrachtet. Unklar ist allerdings wie stark. Berechnungen haben gezeigt, dass ohne weitere verstärkende Rückkopplungsprozesse die Milanković-Zyklen den Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten nicht bewirkt hätten.

Eine Annahme besagt, dass sich die Wirkung der Milanković-Zyklen durch den sogenannten Albedo-Effekt verstärkt haben könnte. Durch die Klimaabkühlung an den Polen ist der Schnee in den Winterzeiten dort länger liegen geblieben und hat die Albedo (Rückstrahlung) verstärkt.

Eine weitere mögliche Ursache ist, dass sich aufgrund der Milanković-Zyklen die Temperatur- und Druckunterschiede zwischen den Breitengraden so verändert haben, dass die globalen Wind- und Meeresströmungen an Intensität zugenommen und so das Klima beeinflusst haben.

Die Milanković-Zyklen könnten also als eine Art Schrittmacher angesehen werden, welche weitere Prozesse des Klimasystems angestoßen und so die jeweilige Abkühlung eingeleitet haben. Weil diese Klimaveränderungen aufgrund einer bekannten astronomischen Konstellation zustande kommen und zudem relativ langsam ablaufen, können sie nicht die Hauptursache für die ungewöhnlich schnelle Erderwärmung der letzten hundert Jahre sein.

WIE BEINFLUSSEN VULKANAUSBRÜCHE DAS KLIMA?

Unter Vulkanismus versteht man alle Erscheinungen, die mit dem Aufsteigen von Magma (Gesteinsschmelze) aus dem Erdmantel an die Erdoberfläche zu tun haben. In der Regel sind diese Erscheinungen an bestimmte Regionen gebunden, bei denen verschiedene tektonische Platten aufeinandertreffen oder auseinanderdriften (siehe Klimawandel und Plattentektonik). Beispiele dafür sind der Pazifische Feuerring und der Mittelozeanische Rücken.

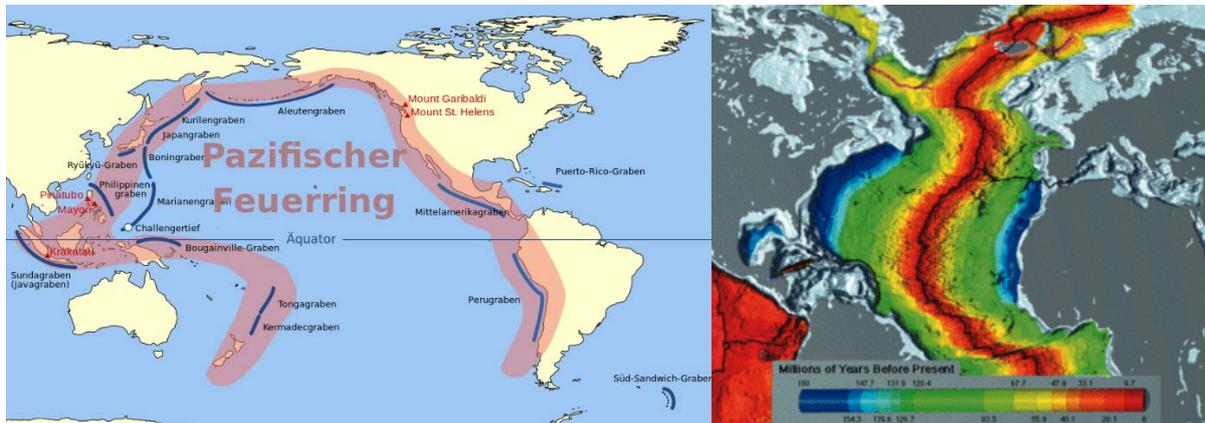


Abbildung 5. Der pazifische Feuerring (rechts) und der Mittelatlantische Rücken (links).

Bildquelle: <https://slideplayer.org/slide/13971113/86/images/49/Zirkumpazifischer+Feuerring.jpg> (Pazifischer Feuerring) und www.wikipedia.org (Mittelatlantischer Rücken).

Wie die Abbildung 5 (links) zeigt, ist der Pazifische Feuerring ein Vulkangürtel, der den Pazifischen Ozean von drei Seiten umgibt. Viele der in der Neuzeit ausgebrochenen Vulkane sind dort zu finden. Auch starke Erdbeben treten entlang dieses Ringes häufiger auf. Der Pazifische Feuerring hat eine Länge von etwa 40'000 Kilometern. Er steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Abtauchen (Subduktion) der ozeanischen Kruste an den Rändern des Pazifiks. Diese tauchen entlang der tektonischen Plattengrenzen entweder unter ozeanischer oder kontinentaler Kruste ab. Dort wo die Erdkruste abtaucht, gibt es einen tiefen Graben. In grosser Tiefe wird durch Druck und Hitze das Gestein des oberen Erdmantels aufgeschmolzen und wenn das Magma bis an die Erdoberfläche steigt, entstehen dort Vulkane. Spannungen, die sich infolge der Grabenbildung in der Erdkruste aufbauen, können sich auch in Form von Erdbeben entladen.

Beim Mittelozeanischen Rücken (vgl. Abbildung 5, rechts) handelt es sich um einen vulkanisch aktiven Gebirgszug in der Tiefsee, der sich entlang der Naht zweier auseinanderstrebender tektonischen Platten erstreckt. An der zentralen Achse dieses Gebirgszuges entsteht kontinuierlich neue ozeanische Erdkruste. Solche Rücken ziehen sich durch nahezu alle Ozeanbecken. Das bekannteste Teilstück liegt im Atlantik und heisst Mittelatlantischer Rücken. Mitten auf dem Mittelatlantischen Rücken liegt Island, das für seine Vulkane bekannt ist (vgl. Abbildung 5, rechts).

EFFUSIVE UND EXPLOSIVE VULKANAUSBRÜCHE

Bei den Vulkanausbrüchen unterscheidet man zwischen effusiven und explosiven Ausbrüchen. Effusive Vulkanausbrüche stossen vor allem flüssige und halbflüssige Laven aus. Das Magma ist sehr heiss und nicht so stark mit explosiven Gasen durchsetzt. Explosive Vulkanausbrüche entstehen durch Überhitzung von Grund- und/oder Meerwasser über der Magmakammer des Vulkans oder wenn das Magma mit explosiven Gasen durchsetzt ist. Derartige Ausbrüche können schlagartig grosse Gesteinsmassen austossen z.B. als Bomben, Lapilli oder Aschen. Durch die Explosion der Magmakammer entsteht bei sehr grossen Vulkanausbrüchen ein riesiger Krater, der als Caldera bezeichnet wird. Der verheerende Ausbruch des Krakatau 1883 in Indonesien war ein derartiger explosiver Ausbruch. Die Überreste der Caldera findet man heute als vier kleine Inseln in der Sundastrasse zwischen Sumatra und Java. Explosive Ausbrüche können unter Wasser auch Flutwellen und Tsunamis auslösen.

GROSSE VULKANAUSBRÜCHE SIND KLIMARELEVANT

Einen nennenswerten Einfluss auf das globale Klimasystem haben nur explosive Vulkanausbrüche, weil dann grosse Mengen an Gasen und festen Partikeln (Asche) ausgeschleudert werden. Die grösseren Partikel fallen jedoch schnell, innerhalb von Tagen oder Wochen, aus der Atmosphäre aus und beeinflussen daher das globale Klima nur kurze Zeit. Wenn grosse Vulkanausbrüche hingegen auch Schwefeldioxid austossen und dieses Gas bis in die obere Atmosphäre (Stratosphäre) eintragen, wird das Klima stärker beeinflusst. Denn das Gas reagiert dort mit Wasser zu Tröpfchen aus Schwefelsäure, die auch Sulfat-Aerosole genannt werden. Die Wolken aus Schwefelsäuretröpfchen reflektieren dann, ebenso wie die Ascheteilchen, das Sonnenlicht zurück ins All und verhindern so, dass dessen Energie die Erdoberfläche erreicht, was die Erdoberfläche zusammen mit der unteren Atmosphäre kühlt. Hinsichtlich einer Abkühlung der Erdoberfläche brachte zum Beispiel der Ausbruch des Mt. Pinatubo auf den Philippinen 1991 circa 20 Millionen Tonnen Schwefeldioxid (SO_2) in die Stratosphäre ein, was die Erde für bis zu ein Jahr um $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ abkühlte. Global betrachtet verringern Vulkanausbrüche auch den Niederschlag, da wegen der Abkühlung weniger Wasser verdunsten kann.

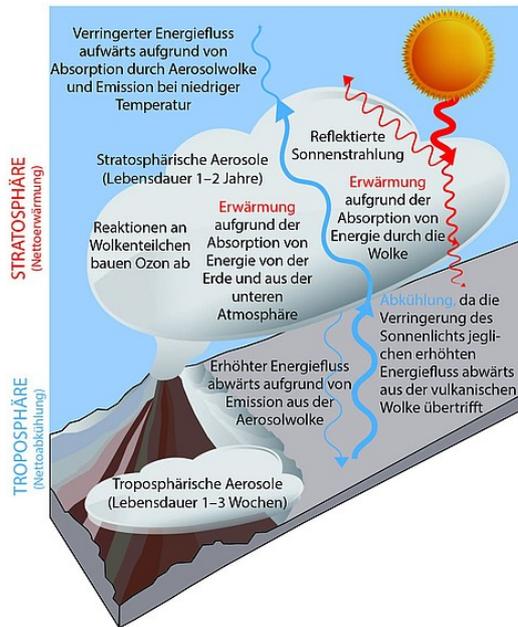


Abbildung 6. Wie grosse tropische oder subtropische Vulkane die Temperaturen in der oberen (Stratosphäre) und unteren Atmosphäre (Troposphäre) beeinflussen. Quelle: IPCC, 2014.

Wenn in höheren Breiten grosse Vulkanausbrüche Schwefelgase in die Stratosphäre einbringen, hat dies nur auf die jeweilige Erdhalbkugel eine Auswirkung, in der die Eruption stattgefunden hat. Die Auswirkungen dauern dabei höchstens ein Jahr, da die von ihnen erzeugte stratosphärische Wolke nur eine Lebensdauer von einigen Monaten hat. Liegen die Vulkane hingegen in tropischen oder subtropischen Breiten können sie eine globale Abkühlung der Erdoberfläche oder der Troposphäre bewirken. In diesen Breiten kann die Schwefelsäurewolke in der oberen Atmosphäre zwischen einem und zwei Jahre bestehen bleiben und einen Grossteil der Erde bedecken.

Die regionalen Folgen für das Klima sind allerdings schwierig vorherzusagen, da die Verteilung stratosphärischer Sulfat-Aerosole stark von den atmosphärischen Windbedingungen zum Zeitpunkt der Eruption abhängt. Wie stark ein Gebiet abgekühlt wird, hängt nicht nur von der Verteilung der Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre, sondern auch von der Verteilung der Landmasse auf der Erde ab. Dies weil der Abkühlungseffekt über Land stärker ausfällt als über dem Meer.

Die Schwefelsäurewolken in der oberen Atmosphäre absorbieren jedoch auch Wärme die von der Erde und von der Sonne kommt. Dadurch kann sich die obere Atmosphäre in den Tropen stärker erwärmen, als in den höheren Breiten, was wiederum Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation hat.

REKONSTRUKTION DER KLIMAWIRKSAMKEIT GROSSER VULKANAUSBRÜCHE

Seit der von Plutarch beschriebenen ersten historisch datierten Verbindung zwischen der Vulkaneruption des Ätna (44 Jahre v. Chr.) und der darauffolgenden Klimaänderung ist der Klimaeinfluss von Vulkanen Gegenstand unzähliger Untersuchungen geworden. Diese reichen von atmosphärischen und geologischen Messungen über die Analyse von Eisbohrkernen und Proxydaten

bis hin zur Klimamodellierung. Direkte Beobachtungen des vulkanischen Aerosols existieren erst seit ein paar Jahrzehnten und umfassen im Wesentlichen zwei Vulkaneruptionen, die des El Chichon im April 1982 und die des Pinatubo 1991.

Mit Hilfe dieser Daten haben Forscher die Klimawirksamkeit von Vulkaneruptionen in der Vergangenheit rekonstruiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt wie sich Vulkanausbrüche in den letzten 1000 Jahren auf die Atmosphäre und damit auf das Klima ausgewirkt haben.

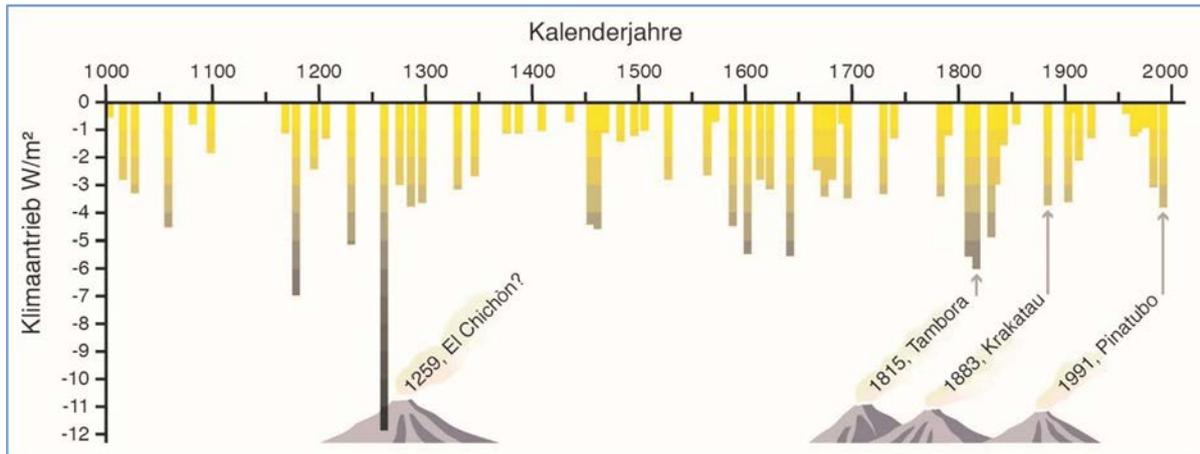


Abbildung 7. Rekonstruktion der Klimawirksamkeit von explosiven Vulkanausbrüchen (Crowley 2000 bearb.) in den vergangenen 1000 Jahren. (Bildquelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/antriebe/vulkane>; verändert).

In der Abbildung 7 geben die Säulen an, in welchen Jahren die Vulkanausbrüche stattfanden. Je dunkler die Säule am unteren Ende ist, desto stärker war der Ausbruch. Vier grössere Vulkanausbrüche werden noch mit Namen erwähnt. Alle vier liegen auf dem Pazifischen Feuerring. Tambora und Krakatau liegen in Indonesien östlich und westlich der Insel Java. Der Pinatubo liegt auf den Philippinen westlich der Insel Luzon und der El Chichon in Mexiko im Nordwesten des Bundesstaates Chiapas.

Der auf der Y-Achse angegebene Klimaertrieb (auch Strahlungsantrieb genannt) ist ein Mass für die Änderungen der Sonnenenergie, die auf der Erde ankommt und wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) angegeben. An den negativen Werten sieht man, dass die abkühlende Wirkung von sehr grossen Vulkanausbrüchen auf die Erdatmosphäre recht bedeutsam sein kann. Die Wirkung hält allerdings nur wenige Jahre an. Verglichen mit dem Einfluss von menschlichen Aktivitäten auf das Klimasystem ist der Einfluss von Vulkanismus heutzutage gering.

Für die Klimavorhersage kann man davon ausgehen, dass es immer wieder grössere Vulkanausbrüche geben wird, die etwa für ein Jahr zu einer signifikanten globalen Abkühlung an der Erdoberfläche und zu einer Erwärmung der oberen Atmosphäre führen. Wann ein Vulkan ausbricht und wieviel Schwefelgas in die obere Atmosphäre eingebracht wird, kann niemand voraussagen. Das Gleiche gilt für die Verteilung der Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre und für die daraus folgenden regionalen Auswirkungen auf das Klima. Deshalb bleiben Vulkanausbrüche eine Unsicherheitsquelle in den Klimavorhersagen.

WIE BEEINFLUSST DIE SONNE DAS KLIMA?

Die Sonne ist der Energielieferant der Erde und zugleich auch der Motor des Klimasystems. Über die Erdbahnelemente kann sie indirekt das Klima auf der Erde beeinflussen. Aber theoretisch könnte sie auch direkt das Klima beeinflussen, wenn sich die Sonnenstrahlung, die sie zur Erde schickt, verstärken oder abschwächen würde.

STRAHLUNGS- UND ENERGIEBILANZ

Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt an der äusseren Atmosphäre 1361 W/m^2 . Von dieser Strahlungsleistung erreicht weniger als die Hälfte die Erdoberfläche. Ein Teil davon wird bereits in der Atmosphäre absorbiert, gestreut und reflektiert. Die Strahlung, welche als direkte oder diffuse Strahlung die Erdoberfläche erreicht, nennt man Globalstrahlung. Ein Teil der Globalstrahlung wird an der Erd- und Wasseroberfläche reflektiert, der grössere Teil dagegen wird absorbiert und in Wärme umgewandelt.

Die Wärmeenergie bzw. Wärmemenge, welche die Erde erreicht, geht in den Transport von Luftmassen und in die Verdunstung über. Der Rest wird von der aufgeheizten Erdoberfläche und den Wasserflächen als Wärmestrahlung wieder zurück in die Atmosphäre gestrahlt. Durch die Wolken und durch die Treibhausgase wird ein Teil dieser thermischen Abstrahlung wieder eingefangen oder zur Erde zurückgestrahlt (Gegenstrahlung). Der Rest der Wärmestrahlung geht zurück in den Weltraum. Wenn die Energiebilanz der Erde sich im Gleichgewicht befindet, dann entspricht die gesamte Sonneneinstrahlung der gesamten Wärmerückstrahlung ins Weltall.

DER EINFLUSS DER SONNENFLECKEN IST GERING

Die Oberfläche der Sonne kann man sich als eine brodelnde Suppe aus heissem Gas vorstellen, die ständig umgewälzt wird. Dabei erscheinen dunkle Flecken und helle Fackeln auf der Sonnenoberfläche. Die dunklen Flecken nennt man Sonnenflecken. Ihre Anzahl steigt und fällt innerhalb eines elfjährigen Zyklus (= Sonnenzyklus). Im Lauf eines Zyklus gibt es Zeiten mit einem Fleckenminimum und solche mit einem Fleckenmaximum. Bei weniger Flecken erhält die Erde weniger Sonnenenergie. Der Unterschied in der Menge der Sonnenenergie bei einem Fleckenminimum oder Fleckenmaximum ist aber sehr klein und kann deswegen nur einen geringen Einfluss auf das Klima haben. Die nachfolgende Abbildung vergleicht die mittlere Erdtemperatur mit der Zahl der Sonnenflecken.

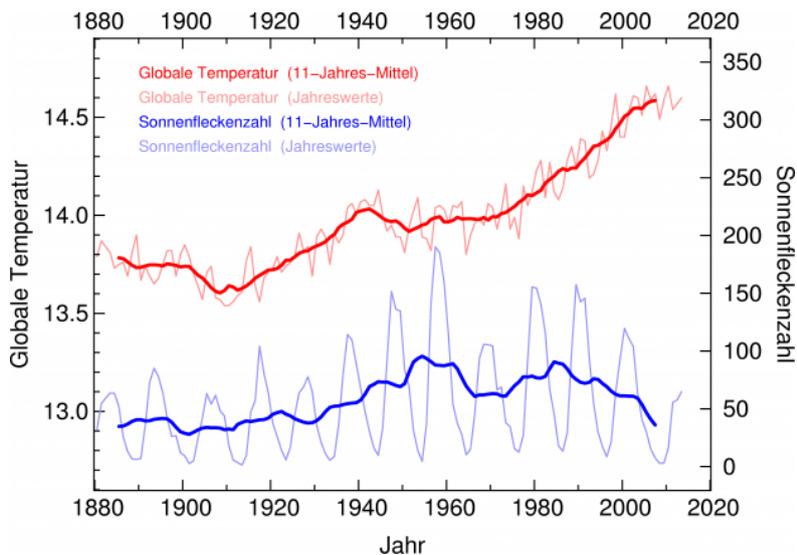


Abbildung 8. Globale Mitteltemperatur (rote Kurve) und Zahl der Sonnenflecken (blaue Kurve) seit 1880. (Die globale Temperatur und Sonnenfleckenzahl sind als laufendes 11-Jahres-Mittel dargestellt).

Quelle: Temperatur lt. [Nasa GISS](https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang), Sonnenflecken lt. [SIDC](https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang). (<https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang>).

Die globale Mitteltemperatur und die Sonnenfleckenzahl verliefen rund ein Jahrhundert übereinstimmend, driften jedoch seit etwa 1975 auseinander. Die Temperatur steigt, während die Sonnenfleckenzahl in den vergangenen 30 bis 40 Jahren rückläufig ist. Wäre die Temperatur von der Zahl der Sonnenflecken abhängig, so hätte es kälter werden müssen. Das Gegenteil ist der Fall: die globale Mitteltemperatur ist stark angestiegen. Selbst wenn die Sonnenfleckenzahl in den nächsten Jahrzehnten wie erwartet weiter zurückgeht, wird dies die menschengemachte Erderwärmung nicht aufhalten.

AUCH DER BEITRAG ZUR VERÄNDERTEN STRAHLUNGSBILANZ IST GERING

Um den Einfluss der Sonnenaktivität genauer zu prüfen, haben die Klimawissenschaften ein Modell entwickelt, welches die Strahlungsbilanz der Sonne auf der Erde berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass die Erde seit 1750 mehr Wärme aufgenommen hat, als sie abgegeben hat. Gemäss den Berechnungen beträgt die Netto-Wärmeaufnahme $2,29 \text{ W/m}^2$. Weil sich die Sonnenstrahlung (Input) in dieser Zeit kaum verändert hat (vgl. Abbildung 9) muss die überschüssige Energie von einer veränderten langwelligen Abstrahlung von der Erde (Output) herrühren. Und hier spielen die menschengemachten Treibhausgase eine wesentliche Rolle.

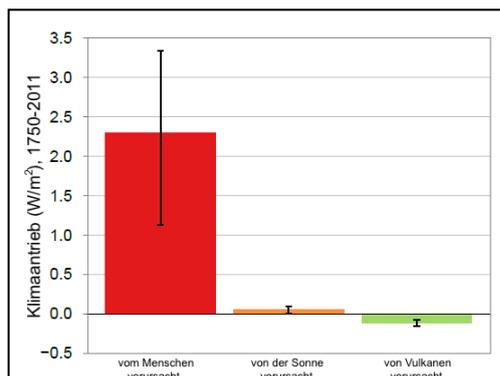


Abbildung 9. Vom Menschen, von der Sonne und von Vulkanen verursachter Klimaantrieb. Quelle: Wuebbles et al., 2017.

Gemäss den Berechnungen spielen die beiden bedeutendsten natürlichen Treiber von Veränderungen des Klimas, Sonne und Vulkane, bisher nur eine untergeordnete Rolle während des Industriezeitalters. Der berechnete Strahlungsantrieb aufgrund von Veränderungen der Sonneneinstrahlung beträgt $0,05 \text{ W/m}^2$. Vulkane haben in der gleichen Zeit gemäss der Abbildung den Strahlungsantrieb um $-0,1 \text{ W/m}^2$ abgeschwächt. Aus diesen Zahlen geht hervor, dass der gesamte natürliche Strahlungsantrieb durch Sonne und Vulkane über das letzte Jahrhundert nur einen kleinen Beitrag an das veränderte Energiebudget geleistet hat. Sie können deshalb die Erwärmung seit der Industrialisierung nicht erklären.

WELTWEITE BEDEUTUNG DER DAVOSER SONNENFORSCHUNG

Die Sonne und ihre Bedeutung für das Klimasystem sind in der Davoser Forschungslandschaft sehr bedeutend. Sie stehen im Zentrum der Arbeit am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos resp. *World Radiation Center*, dem Weltstrahlungszentrum PMOD/WRC im alten Schulhaus über dem Davoser See. Die Forschung am PMOD/WRC konzentriert sich auf die Einstrahlung der Sonne und auf das Strahlungs-Energiegleichgewicht in der Erdatmosphäre (vgl. PMOD/WRC, 2017). Am PMOD/WRC steht die weltweite Strahlungsreferenz, quasi der Urmeter der Sonnenforschung. Er wird durch die Standortgruppe gewährleistet, die aus sechs präzisen Gesamtstrahlungs-Radiometern (Pyrheliometer) besteht. Damit die Sonnenstrahlung weltweit gleich präzise erfasst wird, werden die Strahlungs-Messgeräte nach der radiometrischen Referenz in Davos kalibriert. Dazu treffen sich Expertinnen und Experten aus der ganzen Welt alle 5 Jahre für die Internationalen Pyrheliometer-Vergleiche (IPC) am PMOD/WRC. Die Bedeutung dieses internationalen Treffens wird dadurch unterstrichen, dass der gesamte internationale Flugverkehr am Himmel über Davos während der Messungen umgeleitet wird.

SCHLUSSBEMERKUNG

Klimawandel hat es schon immer gegeben? In der öffentlichen Debatte und im privaten Austausch hört man diesen Satz - als Argument zum nichts dagegen tun - immer wieder. Als Erklärung sind dazu unterschiedliche und teils widersprüchliche Aussagen zu hören. Meistens wird die sogenannte "Mittelalterliche Warmzeit" als Beweis erwähnt. Dass es damals weltweit nicht wärmer war als heute und die Erwärmung sich auf einzelnen Regionen konzentrierte, wissen nur wenige. Trotzdem, es stimmt Klimawandel hat es schon früher gegeben. Das globale Klima hat stets auf jeweils wichtige Einflüsse reagiert. Aber es waren früher ausschliesslich natürliche Ursachen, die zum globalen Klimawandel führten. Heute weisen alle Indikatoren darauf hin, dass die aktuelle Erderwärmung, die im Eiltempo voranschreitet, mit natürlichen Ursachen nicht erklärt werden kann. Über 90 % der Klimaforscherinnen und Klimaforscher sind überzeugt, dass massgeblich der Mensch mit seinem CO₂-Ausstoss den Klimawandel verursacht.

LITERATURVERZEICHNIS

- Cubasch UD, Wuebbles D, Chen MC, Facchini D, Frame N, Mahowald and JG Winther. 2013. Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DKK (Deutsches Klima Konsortium). Wie beeinflussen Vulkanausbrüche das Klima und unsere Fähigkeit, das Klima vorherzusagen? [online]. www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-11-2.htm. Abgerufen am 25.8.2020
- Earthguide. 2017. Pangaea, Gondwanaland, Laurasia and Tethys [online]. www.earthguide.ucsd.edu. Abgerufen am 19.4.2017.
- Erlebnis Geologie. 2017. Wachsen die Alpen? [online]. www.erlebnis-geologie.ch. Abgerufen am 17.4.2017.
- Furrer H, Eichenberger U., Froitzheim N, Wurster D. 1992. Geologie, Stratigraphie und Fossilien der Ducankette und des Landwassergebietes (Silvretta-Decke, Ostalpin). Bericht der gemeinsamen Exkursion der Schweiz. Paläontologischen Gesellschaft und der Schweiz. Geologischen Gesellschaft vom 12. Oktober 1991. *Eclogae geol. Helv.* 85(1): 245-256.
- Furrer H, Schaltegger U, Ovtcharova M, Meister P. 2008. U-Pb zirkon age of volcanoclastic layers in Middle Triassic platform carbonates of the Austroalpine Silvretta nappe (Switzerland). *Swiss J. Geosci.* 101:595-603
- Gemeinde Davos. 1998. Begleitbroschüre zum Landschaftsweg Davos. 2. Auflage 2007
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, and Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1553 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014a. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T and Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014b. Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014c: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017.

Klimafakten.de. Behauptung: Die Sonne verursacht den Klimawandel [online]. www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang. abgerufen 28.8.2020

MPIMET (Max Planck Institut für Meteorologie). 2011. Begrenzter Klimaeinfluss von extrem grossen Vulkanausbrüchen. <https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/aktuelles/im-fokus/klimaeinfluss-von-vulkaneruptionen/> (27.7.2020)

PMOD/WRC (Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center). 2017. Über uns [online]. www.pmodwrc.ch. Abgerufen am 17.4.2017.

Slideplayer. 2020. Pazifischer Feuering [online]. <https://slideplayer.org/slide/13971113/86/images/49/Zirkumpazifischer+Feuerring.jpg>. abgerufen 26.8.2020

Schwarzenbach R, Rentsch C, Müller L (eds). 2011. Mensch Klima!: Wer bestimmt die Zukunft? Lars Müller Verlag, 576 S.

Wikipedia. 2016a. Pangäa [online]. www.wikipedia.org. Abgerufen am 25.8.2016.

Wikipedia, 2016b Milanković-Zyklen [online]. www.wikipedia.org. Abgerufen am 25.8.2016.

Wikipedia. 2020a. Präzession [online]. www.wikipedia.org. Abgerufen am 28.7.2020.

Wikipedia. 2020b. Mittelatlantischer Rücken [online]. www.wikipedia.org. Abgerufen am 26.7.2020.

Wuebbles et al. 2017 - USGCRP, 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp.

LINKS UND WEITERE INFOS

Plattentektonik und Klimaschwankungen

<https://www.youtube.com/watch?v=qaAeqA1SN30>

Eiszeiten und Erdbahnelemente

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Erdbahnparameter>

https://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/klimaschwankungen/ursachen/ursachen_naturliche/ursachen_extraterrestrische/erdbahnparameter_veraenderung/index.html

Vulkanismus

Brönnimann S, Krämer D. 2016. Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816. Klima, Mensch und Gesellschaft. Geographica Bernensia G90, 48 S., doi:10.4480/GB2016.G90.02.

Sonnenaktivität und Klimaschwankungen

<https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-wegen-sinkender-sonnenaktivitaet-wird-der-klimawandel-demnaechst-pausieren>

<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/forschung-und-zusammenarbeit/internationale-zusammenarbeit/pmod-wrc.html>