

S4 Blick auf die Endmoräne

Endmoränen, Eiszeiten in der Erdgeschichte und Eiszeittheorien.

1. Ausblick vom Standpunkt

Nach Süden eröffnet sich über eine flache Senke ein frontaler Blick auf den äußersten würmzeitlichen Endmoränenwall¹, der die Gebäude von Großhartpenning größtenteils verdeckt (Abb. 1).



Abb. 1: Der würmzeitliche Endmoränenwall bei Großhartpenning wurde vor ca. 20.000 Jahren während des Würmmaximums am Eisrand des Tölzer Lobus aufgeschüttet. Die Zeichnung unten rechts zeigt diese maximale Gletscherausdehnung während der Würm-Kaltzeit („W1-Stadium“). Die flache Senke vor dem Wall wurde zu dieser Zeit von Schmelzwässern durchflossen. Der Standort der Tafel befindet sich auf einer Moräne aus der Riß-Kaltzeit (300.000 bis 128.000 Jahre vor heute). Sie ist aufgrund ihres Alters schon stark abgeflacht.

Die Entstehung von Endmoränen² lässt sich auch heute noch an aktuellen Gletschern beobachten (Abb. 2 und 3). Beim Gletschervorstoß und insbesondere bei längeren Stillstandsphasen³ werden am Eisrand ausgeprägte Wallformen aus Moränenmaterial gebildet.



Abb. 2: Frisch aufgeschüttete Endmoräne vor der Gletscherstirn des Brikdalsbreen in Norwegen.



Abb. 3: Der zurückschmelzende Morteratschgletscher in der Schweiz. Im Hintergrund ein aufgeschütteter Endmoränenwall.

¹ Moränen aus der letzten Kaltzeit (Würm-Kaltzeit) werden als Jungmoränen bezeichnet, alle älteren Moränen als „Altmoränen“.

² Moränen, die am Ende einer Gletscherzunge, also an der Gletscherstirn aufgeschüttet werden, nennt man Endmoränen.

³ Auch wenn der Eisrand länger im selben Bereich liegt und scheinbar stillsteht, ist der Gletscher nicht unbeweglich. Er fließt immer hangabwärts, wobei in einer Stillstandsphase der Flächenzuwachs aufgrund des Gletschervorstoßes durch Abschmelzprozesse an der Gletscherstirn wieder kompensiert wird.

S4 Blick auf die Endmoräne

2. Vereisungen in der Erdgeschichte

Im Laufe der Erdgeschichte kam es mehrfach zu starken Klimaschwankungen. Einige markante Abkühlungen waren mit starken Vereisungen verbunden. Der Nachweis solcher Vereisungen ist umso schwieriger, je länger die kalten Phasen zurückliegen.

2.1. Vereisungen im Präkambrium

Nicht einmal ein Achtel der Erdgeschichte ist detailliert rekonstruierbar. Das entspricht dem Zeitraum seit der „kambrischen Explosion“ des Lebens vor 541 Millionen Jahren⁴. Zunächst soll hier aber der davor liegende sehr lange Zeitabschnitt des *Präkambriums* betrachtet werden. Für das Präkambrium konnten mindestens drei Vereisungen nachgewiesen werden (Abb. 4).

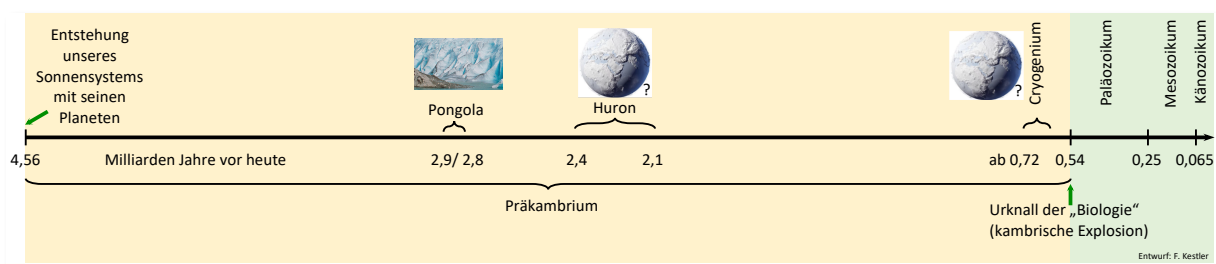


Abb. 4: Zeitstrahl der Erdgeschichte vom Urknall bis heute. Für das Präkambrium ist eine Klimarekonstruktion besonders schwierig, da kaum Fossilien existieren. Trotzdem konnten durch versteinerte Moränen drei Vereisungsperioden für diesen sehr lange zurückliegenden Zeitraum nachgewiesen werden.

Die ältesten nachweisbaren Vereisungsspuren sind 2,8 bis 2,9 Mrd. Jahre alt. Man nennt diese Eiszeit *Pongola-Vereisung*, da die Belege dafür aus Südafrika stammen⁵.

Etwa eine halbe Milliarde Jahre später kam es während des *Huronischen Eiszeitalters* zur am längsten andauernden Vereisungsphase der Erdgeschichte⁶. Sie begann vor 2,4 Mrd. Jahren und dauerte 300 Millionen Jahre. Sie wird mit der „großen Sauerstoffkatastrophe“ in Zusammenhang gebracht⁷.

Darauf folgte eine ca. 1,7 Milliarden Jahre lange Zeit mit warmen Klimabedingungen, bevor es im *Cryogenium* von 720 bis 635 Mio. Jahre vor heute zu den jüngsten Vereisungen innerhalb des Präkambrium kam⁸. Aus dem Cryogenium sind zwei Vereisungen (Sturtische und Marinoische Vereisung) bekannt. Tillite⁹ aus diesen Eiszeiten finden sich überall auf der Erde – sogar in Äquatornähe.

Daher wurde für diese Vereisungen die „Schneeball-Erde-Theorie“ entwickelt, die auch für die Huron-Vereisung angenommen wird. Das Schneeball-Erde-Modell beschreibt einen Zustand der Erde, bei dem die globale Durchschnittstemperatur auf ca. -50°C absank (am Äquator auf ca. -20°C). In der Folge vereiste die Erde vollständig oder fast vollständig. Die Eismächtigkeit wird auf dem Festland auf mindestens 3 bis 4 km, für die Ozeane auf einige hundert Meter bis zu einem Kilometer geschätzt. In Äquatornähe werden für das Meer nur eine geringmächtige Eisschicht (1 bis 2 Meter) oder sogar eisfreie Wasserflächen angenommen. So könnte erklärt werden, wie photosynthesierende Organismen eine solche Phase überlebt haben könnten. Der Nachweis der „Schneeball-Erde-Theorie“ ist aufgrund der wenigen vorliegenden Daten noch umstritten.

⁴ Die Erdgeschichte ab dem Kambrium ist durch vielfältige Spuren des Lebens gekennzeichnet, weshalb dieser Zeitraum auch als Phanerozoikum (= „Zeitalter der sichtbaren Lebewesen“) zusammengefasst wird. Der vor dem Kambrium liegende Zeitraum wird als Präkambrium zusammengefasst und weist deutlich geringere Lebensspuren als das Phanerozoikum auf. Das Präkambrium umfasst mehr als sieben Achtel der Erdgeschichte.

⁵ Pongola ist ein Fluss in Südafrika und die Pongola Supergroup eine geologische Formation in Südafrika.

⁶ Die glazialen Ablagerungen dazu wurden in Kanada in geologische Schichten am Huron-See gefunden.

⁷ Mit „Großer Sauerstoffkatastrophe“ bezeichnet man den starken Anstieg der Sauerstoffkonzentration im Meer und in der Atmosphäre vor 2,4 Mrd. Jahren. Cyanobakterien produzierten durch Stoffwechsel viel Sauerstoff, der sich in der Atmosphäre anreichert. Dort oxidierte der Sauerstoff mithilfe UV-Strahlung Methan zu CO_2 und H_2O . Da der Treibhauseffekt von CO_2 deutlich geringer ist als der von Methan, setzte eine weltweite Abkühlung ein.

⁸ Der Name Cryogenium ist abgeleitet vom griech. „kryos“ = kalt/ Frost/ Eis und „genesis“ = Entstehung/ Geburt.

⁹ Versteinertes Moränenmaterial.

S4 Blick auf die Endmoräne

2.2. Vereisungen im Paläozoikum

Seit der „kambrischen Explosion“ („Urknall der Biologie“) existieren wesentlich mehr Fossilien als im Präkambrium. Dadurch wird eine genauere Rekonstruktion der Erdgeschichte ermöglicht¹⁰. Mit dem Kambrium beginnt vor 541 Mio. Jahren das Paläozoikum (Erdaltertum).

Im *Paläozoikum* kam es zu zwei Vereisungsphasen. Die Ältere davon begann vor 450 Mio. Jahren im Ordovizium und endete vor 420 Mio. Jahren im Silur (Abb. 5). Vereisungsspuren dieser Eiszeit wurden bislang nur in Südamerika und in Nordafrika nachgewiesen, weshalb man auch von „*Anden-Sahara-Vereisung*“ spricht. Es bildete sich nur am Südpol eine Eiskappe, wo sich zu dieser Zeit das Zentrum des großen Südkontinents Gondwana befand¹¹.

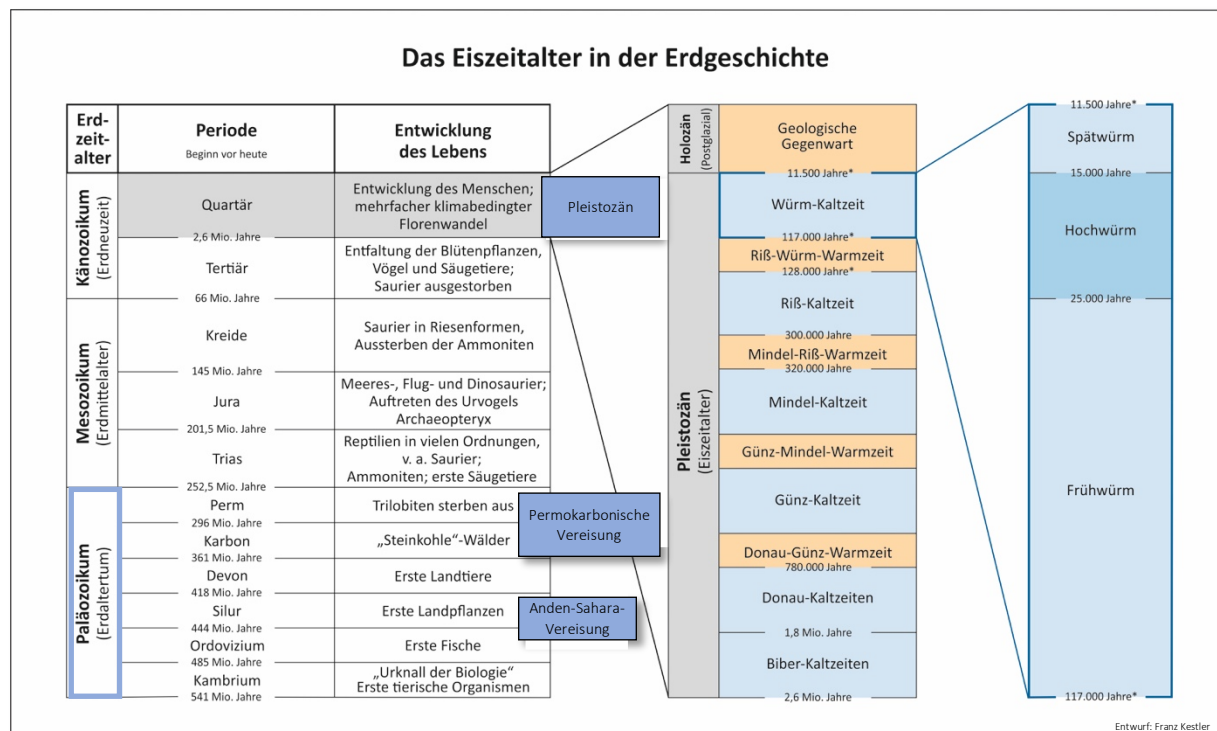


Abb. 5: Zeitliche Einordnung der drei großen Vereisungsphasen nach der „kambrischen Explosion“. Zwei davon fanden im Paläozoikum statt. Das jüngste Eiszeitalter (Pleistozän) im Känozoikum wird auf der folgenden Seite beschrieben.

Die jüngere Vereisung im Paläozoikum begann vor 360 Mio. Jahren im Karbon und endete vor 260 Mio. Jahren im Perm. Spuren für die *permokarbonische Vereisung* wurden vor allem auf den südlichen Teilen des sich zu dieser Zeit vereinigenden Superkontinents Pangäa gefunden¹². So wurden Tillite und Gletscherschrammen in Australien, Indien, Afrika, Südamerika und in der Antarktis gefunden¹³.

Im gesamten *Mesozoikum* (Erdmittelalter) kam es zu keinen großflächigen Vereisungen. Die Trias gilt als wärmstes Zeitalter der Erdgeschichte. Nachweisen lässt sich eine Abkühlungsphase vom oberen Jura bis in die untere Kreide, in der es möglicherweise vereinzelt zur Ausbildung kleinerer Gletscher in Hochgebirgen kam.

Die Vereisungsphasen aus dem Präkambrium und dem Paläozoikum liegen so weit zurück, dass ihre Auswirkungen in der heutigen Gestalt der Erdoberfläche keine Rolle mehr spielen.

¹⁰ Als „kambrische Explosion“ wird ein gigantischer Evolutionsschub zu Beginn des Kambriums vor 541 Mio. Jahren bezeichnet. Innerhalb von wenigen Millionen Jahren entwickelten sich die meisten Vorläufer der heutigen Tierarten. Wegen des daraus folgenden Fossilienreichtums wird die Erdgeschichte ab dem Kambrium als Phanerozoikum (= „Zeitalter der sichtbaren Lebewesen“) zusammengefasst. Es umfasst weniger als ein Achtel der Erdgeschichte und besteht aus Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum.

¹¹ Gondwana ist eine auf der Südhälfte der Erde bestehende große Landmasse, aus deren Zerfall Südamerika, Afrika, Indien, Australien und die Antarktis hervorgingen.

¹² Der Superkontinent Pangäa (= „das ganze Land“) entstand aus dem Zusammenschluss aller vorhandenen Landmassen der Erde. Er existierte vom Karbon bis in den Jura. Wie heute war der Nordpol mit Wasser bedeckt, so dass es schwierig ist, hier Vereisungsspuren zu finden.

¹³ Diese Spuren gehörten zu den Argumenten, mit denen Alfred Wegener seine Kontinentaldrifttheorie begründete. Sie führte schließlich zur Theorie der Plattentektonik.

S4 Blick auf die Endmoräne

2.3. Vereisungen im Känozoikum

Im Känozoikum (Erdneuzeit) wird vor ca. 2,6 Mio. Jahren¹⁴ der Beginn des jüngsten Eiszeitalters (Pleistozän) durch eine deutliche globale Abkühlung gekennzeichnet. Damit verknüpft ist das Auftreten kaltzeitlicher Tiergruppen und die Bildung dauerhaft vergletschter Gebiete. Das Pleistozän bildet zusammen mit dem darauffolgenden Holozän das Quartär. Das Quartär ist die kürzeste und jüngste Periode der geologischen Zeitrechnung. Wird die gesamte Erdgeschichte mit einem Tag verglichen, so umfasst das Quartär kaum mehr als eine Minute.

Im Gegensatz zu älteren Vereisungsphasen war das Pleistozän für weite Bereiche Europas und Nordamerikas landschaftsgestaltend. Dies gilt insbesondere für die Würm-Kaltzeit als jüngste Kaltzeit innerhalb des Pleistozäns und speziell für die Landformen im Alpenvorland, die vom letzten Vorstoß des Eises und dem nachfolgenden Eistrückzug gebildet wurden (Abb. 6 und 7).

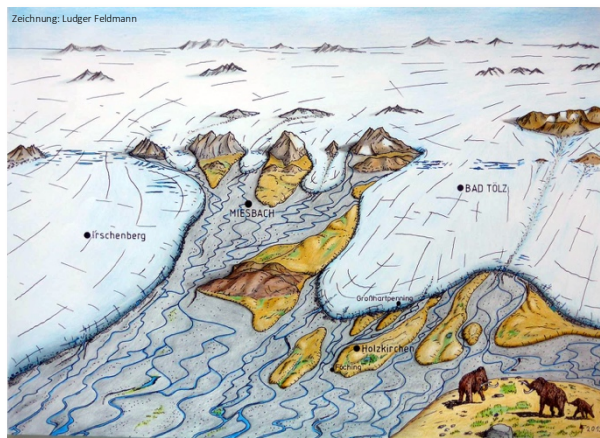


Abb. 6: Maximale Eisbedeckung während der Würm-Kaltzeit vor etwa 20.000 Jahren. Der Tölzer Lobus reichte bis Großhartpenning.



Abb. 7: Nach dem Abschmelzen des Tölzer Gletscherlobus bis südlich Sachsenkam, prägen Rückzugsendmoränen die Landschaft.

Innerhalb des Pleistozäns kam es zu einem mehrfachen Wechsel zwischen *Glazial* (Kaltzeit oder Eiszeit) und *Interglazial* (Warmzeit). Die interglazialen Warmzeiten gehören ebenfalls zum Eiszeitalter, da die vergletscherten Bereiche an den Polen und Gebirgen nicht völlig verschwanden, sondern sich nur verkleinerten. Im Alpenvorland sind mindestens sechs große Kaltzeiten nachgewiesen, von denen die Würm-Kaltzeit (117.000 bis 11.500 Jahre vor heute) die Jüngste darstellt. Die Temperaturen lagen im Alpenvorland in der Würm-Kaltzeit durchschnittlich 10 °C niedriger als heute. Der Vorstoß und Rückzug der würmzeitlichen Gletscher im Alpenvorland erfolgte dabei innerhalb von 10.000 Jahren. Diese Phase innerhalb der Würm-Kaltzeit wird als „Hochwürm“ bezeichnet¹⁵ (S. 3, Abb. 5, rechte Spalte).

Das gegenwärtige *Holozän* begann vor 11.500 Jahren mit einem steilen Temperaturanstieg. Das heutige Temperaturniveau und die gegenwärtige Vegetationsbedeckung wurden vor 10.000 Jahren erreicht. Das Holozän wird auch als Postglazial bezeichnet. Dies bedeutet aber nicht das Ende des Eiszeitalters. Die momentanen Verhältnisse entsprechen denen einer interglazialen Warmzeit, da noch Teile der Erde von Eis bedeckt sind¹⁶. Wir leben also immer noch in einem Eiszeitalter!

¹⁴ Die Internationale Stratigraphische Kommission (ICS) hat 2009 entschieden, dass das Quartär und damit das Pleistozän künftig bei 2,6 Ma (Ma = Mio. Jahre vor heute) an der Basis des Gelasiums (vorher Teil des Tertiärs) beginnt, anstatt wie seit 1985 praktiziert bei 1,8 Ma an der Basis des Kalabriums. Die Zeitmarke 2,6 Ma fällt auch zusammen mit der Umpolung des Erdmagnetfeldes vom normal magnetischen Gauss-Chron zur inversen Feldrichtung des Matuyama-Chrons, so dass in entsprechenden Sedimenten eine weltweite Korrelation einfacher möglich ist. Gleichzeitig begann in diesem Zeitraum die Vereisung auf der Nordhalbkugel. Man könnte den Beginn des modernen Eiszeitalters sogar noch deutlich früher ansetzen, da bereits vor 33,5 Millionen Jahren die Bildung des Antarktischen Eisschildes begann.

¹⁵ Der Übergang vom Hochwürm zum Spätwürm wird festgelegt durch den Zustand, bei dem die Gletscher soweit abgeschmolzen sind, dass das Alpenvorland eisfrei war. Dies war vor etwa 15.000 Jahren der Fall.

¹⁶ Damit ist das Holozän eigentlich Teil des Pleistozäns.

S4 Blick auf die Endmoräne

3. Eiszeittheorien

Eiszeitalter innerhalb der Erdgeschichte sind Ausnahmeerscheinungen. Während des überwiegenden Teils der Erdgeschichte waren die Polregionen und die Gebirge eisfrei. Über die Ursachen für die Entstehung von Eiszeiten gibt es mehrere Hypothesen, sog. Eiszeittheorien.

Für das aktuelle Eiszeitalter (Pleistozän) können aufgrund von Untersuchungen an Tiefsee-Bohrkernen¹⁷ die Klimaschwankungen zwischen Kalt- und Warmzeiten gut rekonstruiert werden. So dominierte in den letzten 800.000 Jahren ein Kaltzeit-Warmzeit-Zyklus von jeweils etwa 100.000 Jahren. Davor herrschte ein Zyklus von 40.000 Jahren vor. Als Auslöser dieser zyklischen Klimaschwankungen werden regelmäßige *Änderungen der Erdbahnelemente* - also extraterrestrische Ursachen - angesehen. Dies betrifft die Exzentrizität der Erdumlaufbahn, also die Änderung der Erdumlaufbahn zwischen fast kreisförmig und stärker elliptisch (Zyklus ca. 100.000 Jahre), Schwankung der Erdachsenneigung zwischen 22,1° und 24,5° – aktuell liegt diese bei 23,5° (Zyklus ca. 41.000 Jahre) und der Präzession, also der Bewegung der Erdachse um die Senkrechte auf der Bahnebene (Zyklus ca. 25.800 Jahre). Daraus lassen sich Schwankungen der Solarstrahlung berechnen, die sogenannten „Milanković-Zyklen“¹⁸. Diese „Strahlungskurven“ korrelieren gut mit dem Kaltzeit-Warmzeit-Zyklen des Pleistozäns.

Da die „Milanković-Zyklen“ dauerhaft, also auch außerhalb des Eiszeitalters stattfanden und stattfinden, sind als auslösende Ursachen für den Beginn und Ende eines Eiszeitalters andere Faktoren notwendig. Dabei werden vor allem erdgebundene Einflüsse diskutiert. Die meisten davon ändern sich nur sehr langsam über größere Zeiträume hinweg:

- Lage der Kontinente: Eine wichtige Grundbedingung scheint die Lage von Landmassen in Polnähe zu sein. Während aller Vereisungen lagen Kontinente in der Nähe des Südpols.
- Zusammensetzung der Atmosphäre: Meist war der Beginn eines Eiszeitalters mit einer Abnahme des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre verbunden (durch üppige Vegetation oder starke Verwitterung).
- Großrelief: Gebirgsbildung beeinflusst das globale Windsystem, bietet durch die Höhenlage die Voraussetzung für Gebirgsvergletscherung und fördert die Verwitterung.
- Meeresströmungen, verändert vor allem durch die Lage der Kontinente.
- Vulkanausbrüche: Aschepartikel reduzieren Sonneneinstrahlung, CO₂ erhöht Treibhauseffekt.
- Selbstverstärkungseffekte: Beispielsweise bewirkt eine Vergrößerung der Schnee- und Eisflächen eine stärkere Reflektion von Sonnenlicht, was den Abkühlungseffekt weiter verstärkt (Albedo-Effekt).

Blick in die Zukunft: Für die derzeitige Warmzeit (Holozän) ist auf der Basis der Erdbahnelemente eine Länge von mindestens 30.000 Jahren zu erwarten. Allerdings wird gegenwärtig der orbitale Trend durch den anthropogenen Klimawandel überlagert. Die durch den Menschen verursachten Emissionen von Treibhausgasen haben fast überall auf der Erde zu einem beschleunigten Gletscherschwund geführt. Der Übergang von einer Warmzeit (Interglazial) zu einer Kaltzeit (Glazial) erfolgte in den letzten 800.000 Jahren nie oberhalb eines CO₂-Gehalts von 260 ppm. Der momentane CO₂-Gehalt liegt bei 419 ppm¹⁹.

Stand: März 2022

Franz Kestler

¹⁷ In Marine kalkschalige Organismen bauen die Sauerstoffisotope ¹⁶O und ¹⁸O in dem Verhältnis ein, das sie im Meerwasser vorfinden. Das leichtere Sauerstoffisotop ¹⁶O ist stärker von der Verdunstung betroffen. Wenn dann in Kaltzeiten ein erheblicher Teil davon im Festlandeis gebunden wird, sinkt der ¹⁶O-Anteil im Meerwasser. Maxima und Minima des ¹⁶O-Anteils repräsentieren dann entsprechende Temperaturschwankungen, die man als „Marine Isotopen-Stadien (MIS)“ bezeichnet. Diese werden beginnend mit dem jüngsten durchnummeriert. Das Pleistozän umfasst MIS 1 bis MIS 103, was etwa 51 Kalt- und Warmzeiten entspricht.

¹⁸ Der serbische Mathematiker Milutin Milanković veröffentlichte 1941 seine Berechnungen und die mögliche Anwendung auf das „Eiszeitproblem“. Dies stieß zunächst vielfach auf Skepsis und erst die Ergebnisse aus den Tiefsee-Bohrkernen machten deutlich, dass die Vermutung im Prinzip doch richtig war. Allerdings sind diese Strahlungsänderungen so gering, dass sie nur in besonders sensiblen Phasen der Erdgeschichte zum Tragen kommen. Das gilt etwa für Phasen mit niedrigem CO₂-Gehalt und bereits bestehender Vergletscherung.

¹⁹ 419 ppm (= parts per million) ist der monatliche Durchschnitt für Februar 2022 am Mauna Loa Observatorium. Quelle: Global Monitoring Laboratory (GML) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Der Anstieg hat sich in den letzten 20 Jahren beschleunigt. Der vorindustrielle Wert lag bei 280 ppm.