

Reinhard O. Greiling (FGS, MLS)

Klimawandel in der Erdgeschichte – Beobachtungen und Phänomenologie historisch

Spuren des Klimawandels sind in der gesamten Erdgeschichte zu finden. Der folgende Text zeigt eine Auswahl dieser Spuren und gibt Hinweise auf geologische Prozesse, die den Klimawandel bedingen oder beeinflussen.

1. Sediment- bzw. Schichtgesteine und Klima

Die oberen Bereiche der Lithosphäre stehen in einer ständigen Wechselwirkung mit Hydrosphäre und Atmosphäre, deren Parameter sich ständig wandeln. Unter den atmosphärischen und hydrosphärischen Einflüssen entstehen durch Verwitterung existierender Gesteine Komponenten klastischer Sedimente. Sie werden durch Strömungen in Wasser oder Luft transportiert und bei deren Energieabnahme sedimentiert. Gelöste Komponenten können entweder durch chemische oder biologische Aktivität (z. B. Karbonate, Abb. 1) abgelagert oder durch Evaporation (Evaporite, Abb. 1) gebildet werden. Schließlich bilden sich aus der Biosphäre auch organische Sedimente, die für unsere Energieversorgung sehr wichtig sind (z. B. Kohle, Abb. 1). Dabei sind die Temperatur- bzw. Klimabedingungen von entscheidender Bedeutung. Entsprechend lässt sich aus den Sediment-Gesteinen auf das Klima bzw. auf ihre geografische Lage relativ zu den Klimagürteln der Erde während ihrer Bildung schließen. Solche klimarelevanten Sedimentgesteine zeigt Abbildung 1. Über die Lithologie hinaus werden heute vor allem isotopengeologische Parameter zur Bestimmung der Paläotemperatur verwendet (McKenzie et al. 2019 und Referenzen dort), während magnetische Methoden (z. B. Soffel 1991) paläogeografische Breiten ermitteln können.

Zusammen mit der Information über das Alter der Gesteine durch paläontologische und isotopengeologische Methoden ist nun eine paläogeografische Erfassung der Klimagürtel zu der entsprechenden Zeit möglich. Das Auftreten von weitverbreiteten glazialen Sedimentgesteinen bis in niedrige Breiten zeigt ein kaltes Klima während der entsprechenden Zeiteinheit an. Umgekehrt gibt es Zeiten aus denen keine glazialen Ablagerungen bekannt

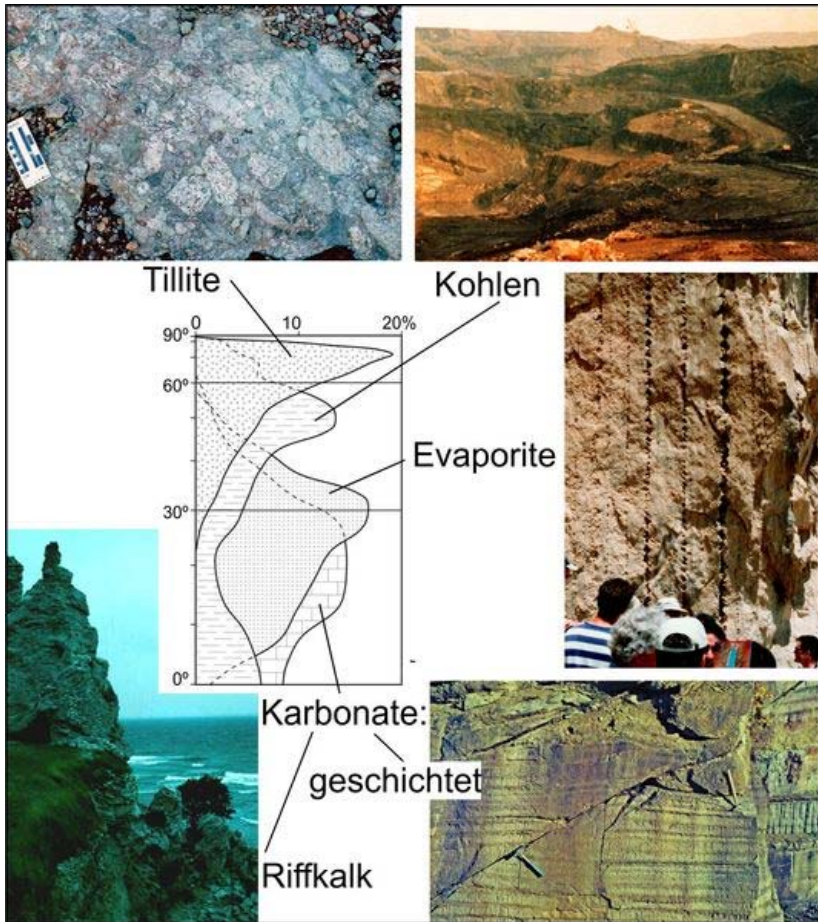


Abb. 1: Klimarelevante Sedimentgesteine und ihre Beziehung zu den geographischen Breiten bzw. Klimagürteln der Erde

Die Prozentzahlen beziehen sich auf den Anteil an den Sedimentgesteinen insgesamt (meist Sand- und Tonsteine). Grafik nach Woodcock/Strachan (2012; Fig. 1.5b). **Tillite**: Durch Eis abgelagerte unklassierte Sedimente, Ediacarum (Gaskiers glaciation, vergl. Abb. 2), Västerbotten, Schweden; **Kohle**: Blick in Steinkohlen-Tagebau mit Sedimentzyklen aus sandigen Gesteinen (hell) und Kohle (schwarz), Ober-Karbon, South Wales Coalfield, Groß-Britannien; **Evaporite**: Steinsalz-Abfolge, Neogen, SW-Rand des Toten Meeres, Israel; steilgestellte Schichten durch plattentektonische Bewegungen; **Karbonate**: Links Riffkalk ungeschichtet, durch riffbildende Organismen entstanden, Silur, Gotland, Schweden; rechts (zyklisch-) geschichtete Kalke, Ordovizium, Jämtland, Schweden; Frakturen (diagonal) durch kaledonische Gebirgsbildung.

sind, die dann als Perioden mit warmem Klima interpretiert werden können. Abbildung 2 gibt eine Zusammenstellung solcher Warm- und Kaltzeiten seit dem sogenannten „Cryogenian icehouse“. Die Abbildung stützt sich auf die Arbeit von McKenzie et al. (2019), die auch weitere Details zu den Methoden und den einzelnen Perioden gibt.

2. (Platten-)Tektonik, Kontinente und Klima

Vor allem die Periode des Kryogenium zeichnet sich durch lange Kaltzeiten aus, die eventuell dazu führten, dass der ganze Globus von Eis bedeckt war. Eine solche Situation ist als „snowball earth“ intensiv diskutiert worden (z. B. Hoffmann et al. 1998; Hoffman/Schrag 2002). Bei dieser Diskussion zeigt sich die Bedeutung der plattentektonischen Entwicklung auf der Erde. Die Plattenbewegungen führen dazu, dass Gesteine, die in einer Klimazone gebildet wurden, in eine andere verschoben werden können. Erst wenn der Nachweis erbracht ist, dass z. B. glaziale Ablagerungen (Tillite, Abb. 1) wirklich in Äquatornähe entstanden, kann eine „snowball earth“ Vereisung angenommen werden.

Abbildung 2 zeigt auch weitere Effekte der Plattentektonischen Entwicklung. Die Konvergenz führt im Laufe der Entwicklung zur Kollision verschiedener Kontinental-Platten, zur Bildung von Gebirgen an den entsprechenden Plattenrändern (Orogenese) und schließlich zur Bildung größerer Kontinente. Während mancher Perioden entstehen dabei besonders große Super-Kontinente. Die Spalten Orogenese und Super-Kontinente auf Abbildung 2 zeigen die wichtigsten Beispiele aus der jüngeren Erdgeschichte. In zeitlicher und kausaler Folge der Super-Kontinente lagern sich terrestrische Rot-Sedimente ab: Im Inneren der (Super-)Kontinente entwickelt sich ein ausgeprägtes kontinentales Klima mit geringen Niederschlägen und damit ariden Umweltbedingungen. Diese Situation bedingt die Entstehung von Wüsten und die Sedimentation terrestrischer, arider Sedimente. Die dort abgelagerten Sedimentgesteine spiegeln diese Bedingungen wider mit oft durch Wind transportierten Komponenten, geringen Anzeichen biologischer Aktivität und oxidierenden Verhältnissen.

Besonders offensichtlich wird dies durch rote Sedimentgesteine, in denen das vorhandene Eisen in oxidiertem Zustand vorliegt und somit eine Rotfärbung verursacht. Abbildung 3 gibt Beispiele solcher Sedimentgesteine aus der heutigen Sahara und aus dem Perm Mitteleuropas. Ähnliche aride Sedimente finden sich auch nach den anderen Orogenesen im Lauf der Erdgeschichte (Abb. 2).

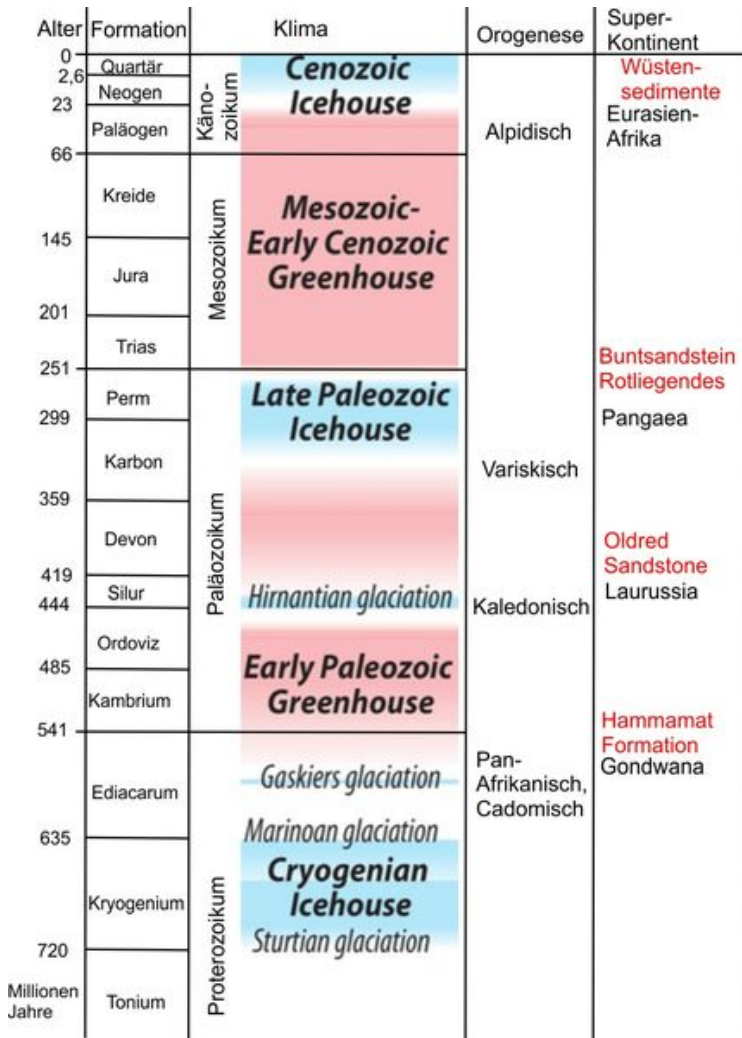


Abb. 2: Übersicht der wichtigsten Kaltzeiten und Warmzeiten während der jüngsten 800 Millionen Jahre der Erdgeschichte

Daneben ausgewählte Orogenese-Ereignisse und die dadurch entstandenen Superkontinente. Darüber in roter Farbe Sedimentformationen, die sich am Ende der Orogenese und im Innern von Superkontinenten abgelagerten. Altersdaten von Cohen et al. (2013, updated 2020-01), Klimaperioden von McKenzie et al. (2019).

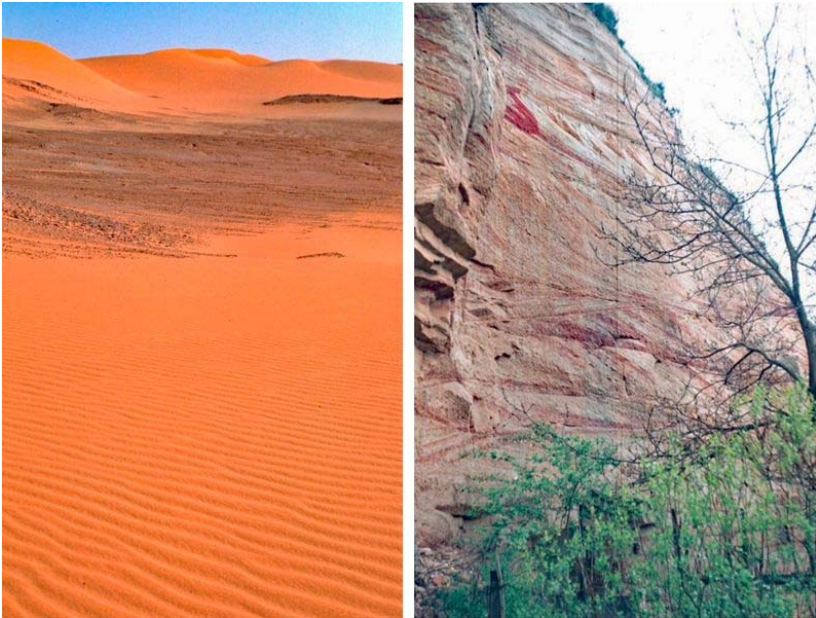


Abb. 3: Beispiele terrestrischer Sedimentgesteine im ariden Klima

Links: Wüstenlandschaft mit Dünen aus hellrotem Sand, rezent; Sahara, SW-Ägypten; Rechts: hellroter Sandstein mit großräumiger Schrägschichtung wie sie in Wind-transportiertem Sand (Dünen) entsteht; Kreuznacher Sandstein, Perm (Rotliegendes), Bad Kreuznach, BRD.

3. Plattentektonik, Vulkanismus und Klima

Die Ränder der Lithosphärenplatten sind im Allgemeinen gesäumt von Vulkanen, die den überwiegenden Anteil von Eruptionen und deren Produkten repräsentieren. Abbildung 4 zeigt eine Auswahl besonders großer vulkanischer Ereignisse der Erdgeschichte der letzten 500 Millionen Jahre. Neben der Bedeutung für die Entwicklung der Lebewesen (z. B. Keller 2012) haben diese Prozesse auch das Klima wesentlich beeinflusst.

Viele der vulkanischen Provinzen liegen auf Plattengrenzen bzw. entstehenden Grenzen mit Divergenz bzw. Dehnung und Bildung ozeanischer Lithosphäre (z. B. Parana-Etendeka, Atlantik auf Abb. 4) und in großen Intraplatten-Provinzen (z. B. Karoo, Kerguelen). Während durch einige dieser Ereignisse, z. B. im Nord-Atlantik, große Mengen von Methan freigesetzt wurden und eine Klimaerwärmung stattfand (z. B. Frieling et al. 2016), bewirk-

ten andere Ereignisse durch große Mengen von Staub und Aerosolen eine Abkühlung des Klimas. Entsprechend der Größe dieser Ereignisse ist deren Einfluss auf die Abkühlung der Atmosphäre sehr bedeutend (z. B. Keller et al. 2012; McKenzie et al. 2019). Für weitere Beispiele siehe etwa Ramstein et al. (2019).

Während die bisher diskutierten Prozesse das Klima in größeren Zeiträumen veränderten, hat besonders der Vulkanismus auch kurzfristige Klimaänderungen im Laufe von wenigen Tagen oder Monaten verursacht. Im

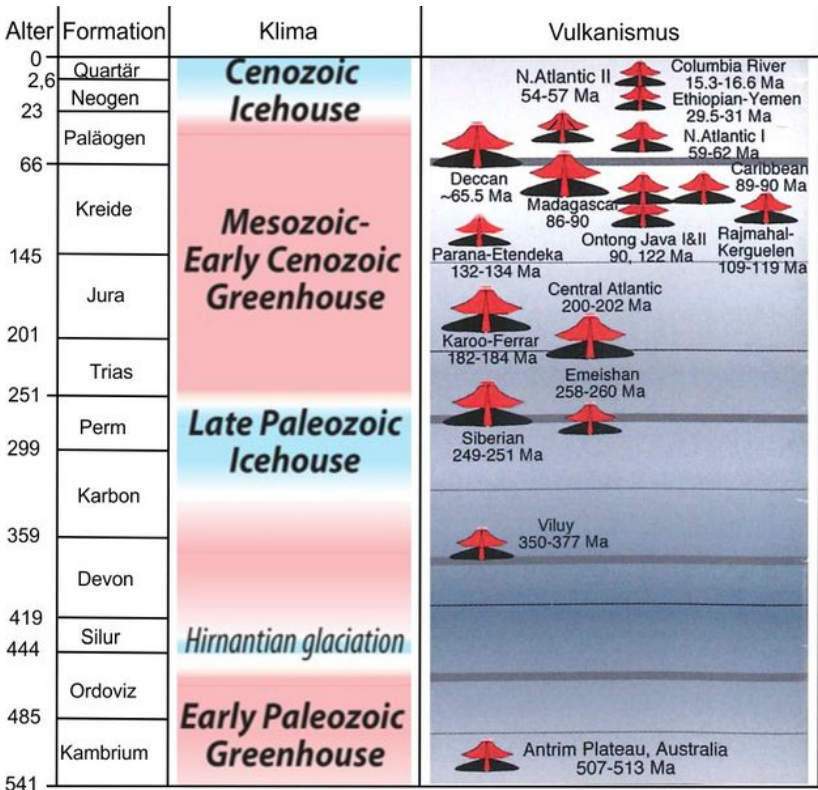


Abb. 4: Beziehungen zwischen Klimaperioden (links) und vulkanischen Großereignissen (rechts) im Phanerozoikum

Altersdaten in Millionen Jahren (Ma) und Klimaperioden wie in Abb. 2, vulkanische Ereignisse nach Keller et al. (2012).

vorigen Jahrhundert bewirkten die Aktivitäten der Vulkane Mount St. Helens oder Pinatubo jeweils eine Abnahme der globalen Durchschnittstemperatur in der Größenordnung von 1°–2° Celsius (z. B. Viner/Jones 2000; USGS 2020). Im Laufe der letzten Jahrtausende hatten offenbar solche Ereignisse einen großen Einfluss auf die Geschichte des Menschen (z. B. Schwarzschild 2012). Für Europa hat dies z. B. Behringer (2007) sehr ausführlich dokumentiert. Harper (2017) zeigt den Einfluss des Klimas auf die Entwicklung des Römischen Reiches und interpretiert den „Untergang“ als Folge einer „spätantiken kleinen Eiszeit“ von ca. 450–700.

Diskussion

In summa zeigen die genannten Phänomene, dass Klimawandel durch zahlreiche geologische, auch kurzfristig wirkende, Faktoren beeinflusst wird. Deshalb erscheint es wichtig, diese Faktoren in der aktuellen Klimadebatte nicht zu vergessen. Das Beispiel der Meeresspiegelschwankungen in Nordeuropa nach der letzten Vereisung seit etwa 12.000 Jahren zeigt die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Tektonik und Klima. Dem entsprechend wird das Thema seit Jahrhunderten kontrovers diskutiert (z. B. Nordlund 2001) und ein endgültiger Abschluss ist noch nicht möglich (z. B. Pässe/Daniels 2015). Im Gegensatz dazu erweckt die öffentliche Diskussion des Klimas und dessen Wandel oft den Eindruck, dass dabei bereits eine endgültige Wahrheit gefunden ist. Die wissenschaftliche Diskussion sollte sich davon klar abgrenzen und darauf hinweisen, dass gerade kurzfristig wirkende (geologische) Faktoren genauere Prognosen erschweren können. Mit anderen Worten hat dies Michael Pilz in der Literarischen Welt vom 8. Februar 2020 so formuliert:

„Das Klima steht auf der politischen Agenda, wo es hingehört, ganz oben, dort steht es aber auch allem anderen im Weg, vor allem der Wahrheitsfindung.“

Literatur

- Behringer, W. (2007): Kulturgeschichte des Klimas – Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung. München: C.H. Beck, 352pp.
- Cohen, K. M.; Finney, S. C.; Gibbard, P. L.; Fan, J.-X. (2013): The International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36, 199–204
- Frieling, J.; Svensen, H. H.; Planke, S.; Cramwinckel, M. J.; Selnes, H.; Sluijs, A. (2016): Thermogenic methane release as a cause for the long duration of the PETM. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (43), 12059–12064

- Harper, K. (2017): *The Fate of Rome – Climate, Disease, and the End of an Empire*. Princeton University Press, Princeton and Oxford; xii, 417pp.
- Hoffman, P. F.; Kaufman, A. J.; Halverson, G. P.; Schrag, D. P. (1998): A Neoproterozoic snowball Earth. *Science* 281, 1342–1346
- Hoffman, P. F.; Schrag, D. (2002): The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14, 129–155
- Keller, G.; Armstrong, H.; Courtillot, V.; Harper, D.; Joachimski, M.; Kerr, A.; McLeod, N.; Napier, W.; Palfy, J.; Wignall, P. (2012): *Volcanism, impacts and mass extinctions*. *Geoscientist*, November 2012; The Geological Society of London
- McKenzie, N. R.; Jiang, H. (2019): Earth's Outgassing and Climatic Transitions: The Slow Burn Towards Environmental „Catastrophes“? *Elements* 15, 325–30
- Nordlund, C. (2001): *The Elevated Land – Science, Land Elevation and the Formulation of a Swedish Past, 1860–1930*. (Swedish text with a summary in English). *Acta Regiae Societatis Skytteanae* 53, 1–422. (Kungl. Skytteanska Samfundet, Umeå)
- Okin, G. S. (2017): Environmental impacts of food consumption by dogs and cats. *PLoS ONE* 12(8): e0181301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181301>
- Pässe, T.; Daniels, J. (2015): Past shore-level and sea-level displacements. *Geological Survey of Sweden, Rapport och meddelanden* 137, 1–40
- Ramstein, G.; Godderis, Y.; Donnadieu, Y.; Sepulchre, P.; Fluteau, F.; Zhang, Z.; Zhang, R.; Su, B.; Jiang, D.; Schuster, M.; Besse, J. (2019): Some illustrations of large tectonically driven climate changes in Earth history. *Tectonics* 38, 4454–4464. <https://doi.org/10.1029/2019TC005569>
- Schwarzschild, B. (2012): The triggering and persistence of the little ice age. *Physics Today* April 2012, 15–18
- Soffel, H. C. (1991): *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*. Springer-Verlag, 292pp.
- USGS (2020): Volcanoes can affect the Earth's climate. https://volcanoes.usgs.gov/vhp/gas_climate.html
- Viner, D.; Jones, P. (2000): Volcanoes and their effect on climate. Climatic Research Unit. <http://www.cru.uea.ac.uk/documents/421974/1295957/Info+sheet+%2313.pdf/8f7e9115-8a35-4ec2-b45d-f3ba36524a44>
- Woodcock, N. H.; Strachan, R. A. (2012): *Geological History of Britain and Ireland* (2nd ed.). Chichester: Wiley-Blackwell, 422pp.