

- HEGNER, E., KRÖNER, A. & P. HUNT (1994): A precise U-Pb zircon age for the Archean Pongola Supergroup volcanics in Swaziland. - *J. African Earth Sci.*, 18: 339-341.
- HOFFMAN, P. F., KAUFMAN, A. J., HALVERSON, G. P. & D. P. SCHRAG (1998): A Neoproterozoic snowball Earth. - *Science*, 281: 1342-1346.
- KEMPER, E. & H. H. SCHMITZ (1981): Glendonite - Indikatoren des polarmarinen Ablagerungsmilieus. - *Geol. Rdsch.*, 70: 759-773.
- KIRSCHVINK, J. L. (1992): Late Proterozoic low-latitude glaciation: the snowball Earth. - In: Schopf, J.W. & Klein, C. (Hrsg): *The Proterozoic Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge: 51-52.
- KOPP, R. E., KIRSCHVINK, J. L., HILBURN, I. A. & C. Z. NASH (2005): The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. - *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 102: 11131-11136.
- MESCHEDÉ, M. (2015): *Geologie Deutschlands, ein prozessorientierter Ansatz*. - Springer-Spektrum, Berlin Heidelberg, 249 S.
- REITNER, J. (2011): Mass Extinctions, Phanerozoic. In: *Encyclopedia of Geobiology*. - *Encyclop. Earth Sci. Ser.*, 543-547.
- SCHER, H. D. & E. E. MARTIN (2006): Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage. - *Science*, 312: 428-430.
- SOHL, L. E., CHRISTIE-BLICK, N. & D. V. KENT (1999): Paleomagnetic polarity reversals in Marinoan (ca 600 Ma) glacial deposits of Australia: implications for the duration of low-latitude glaciation in Neoproterozoic time. - *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 111: 1120-1139.
- TANKARD, A. J., JACKSON, M., ERIKSSON, K. A., HOB-DAY, D. K., HUNTER, D. R. & W. E. L. MINTER (1982): Crustal Evolution of Southern Africa: 3.8 Billion Years of Earth History. - Springer, New York, 523 S.
- YOUNG, G. M., VON BRUNN, V., GOLD, D. J. C. & W. E. L. MINTER (1998): Earth's oldest reported glaciation: Physical and chemical evidence from the Archean Mozaan Group (similar to 2.9 Ga) of South Africa. - *J. Geol.*, 106: 523-538.
- YOUNG, G. M., LONG, D. G. F., FEDO, C. M. & H. W. NESBITT (2001): Paleoproterozoic Huronian basin: product of a Wilson cycle punctuated by glaciations and a meteorite impact. - *Sedimentary Geology*, 141-142: 233-254.

Kontakt:

Prof. Dr. Martin Meschede
 Universität Greifswald
 Institut für Geographie und Geologie
 meschede@uni-greifswald.de

Meschede, M. (2015): Vereiste und eisfreie Erde. Ein Überblick. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp 31-37. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de - doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.05

2.2 Schneeball-Erde – die größte Vereisung der Erdgeschichte

HENRIK ROTHER & MARTIN MESCHEDÉ

Schneeball-Erde – die größte Vereisung der Erdgeschichte: Die Schneeball-Erde-Hypothese beschreibt mehrere extreme glaziale Ereignisse des Präkambriums, in deren Folge die Erde vollständig oder nahezu vollständig vereiste. Während dieser Phasen erstreckten sich ausgedehnte Gletschermassen bis in die Äquatorregion und die Ozeane waren weitgehend durch Meeres- bzw. Gletscherschelfeis bedeckt. Das Konzept der ‚Schneeball-Erde‘ (Snowball-Earth) wurde 1992 von Joseph Kirschvink formuliert, nachdem an verschiedenen Punkten der Erde glazial gebildete Sedimente des späten Proterozoikums belegt werden konnten, die nach paläomagnetischen Rekonstruktionen in Äquatornähe entstanden. Als primärer Auslöser für die Schneeball-Erde Vereisungen wird eine drastische Verringerung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration angenommen, wobei die resultierende Vergletscherung durch zahlreiche Rückkopplungseffekte weiter verstärkt wurde. Zusätzlich führte die spätproterozoische Konzentration kontinentaler Landmassen in tropischen Breitengraden zu einer Intensivierung der chemischen Silikatverwitterung, wodurch der globalen Atmosphäre große Mengen des klimawirksamen Treibhausgases Kohlendioxid entzogen wurden. Hinzu kommt, dass diese Landmassen einen wesentlich größeren Teil der intensiven äquatorialen Solareinstrahlung reflektieren, als dies bei offenen Meeresflächen der Fall gewesen wäre (Albedoeffekt). Nachdem länger unklar war, wie der Zustand einer Schneeball-Erde aus energetischer Sicht beendet werden kann, wird heute davon ausgegangen, dass langanhaltende vulkanische Eruptionen am Ende des Cryogeniums (vor ca. 630 Mill. Jahren) den CO₂ Gehalt der Atmosphäre drastisch erhöhten und damit zur Termination der Vergletscherung führten.

»Snowball-Earth« - the largest glaciation of the Earth's history: The 'Snowball-Earth' concept describes several extreme glacial events within the Precambrian period during which our planet was entirely or nearly entirely glaciated. During these phases ice sheets extended far into the equatorial regions while most of the world's oceans were covered by thick shelf ice. The 'Snowball Earth' model was first proposed by Joseph Kirschvink in 1992 following the discovery of glacial sediments of the late Proterozoic age, which had formed at low latitudes and within equatorial areas as was concluded from and paleomagnetic reconstructions. As primary cause for a global glaciation of this magnitude a drastic reduction in atmospheric greenhouse gas content. An important contributing factor in this was the late Proterozoic concentration of large continental land masses in low latitude areas, leading to a strongly enhanced chemical silicate weathering regime and an associated removal of carbon dioxide from the global atmosphere. These continents also reflected a much larger proportion of the intense equatorial insolation than open oceans would have done (albedo effect). Based on an assessment of the global climate energy budget under a Snowball Earth scenario, the long debate on how a glaciation of this magnitude could terminate again, has arrived at today's interpretation that long lasting volcanic eruptions at the end of the Cryogenic period (630 million years ago) triggered a marked increase in atmospheric CO₂ and terminated the largest glaciation in Earth's history.

Bereits im Proterozoikum kam es auf der Erde mehrfach zu lang andauernden und intensiven Vereisungsphasen. Es entwickelten sich ausgedehnte Eisschilde, die z.T. sogar ganze Kontinente bedeckten. In den 1960er Jahren wurde erstmals die Vermutung geäußert, dass eine oder mehrere dieser Vergletscherungen die gesamte Erde betrafen und sich eine geschlossene Gletscherdecke von Pol zu Pol erstreckte (z.B. HARLAND 1964). Für diese Hypothese nutzte der Paläomagnetiker JOE KIRSCHVINK (1992) erstmalig den Begriff »Schneeball-Erde« (Snowball Earth). Bis heute ist das Modell einer proterozoischen Komplettergletscherung der Erde jedoch umstritten, insbesondere wird die Frage aufgeworfen, wie bereits entwickelte Lebewesen unter einer komplett geschlossenen Eisdecke überleben konnten? Zudem ist unklar, inwieweit der anzunehmende sehr starke Albedo-Effekt einer Vergletscherung solchen Maßstabs überhaupt wieder den Übergang zu normalen, eisfreien Zuständen erlaubt. Die Albedo (von lat. albus – weiß) beschreibt das Sonnenlicht-Rückstrahlvermögen einer Oberfläche: je heller die Oberfläche, desto stärker der Albedo-Effekt. Dennoch wird heute angenommen, dass sich die Erde im Laufe ihrer geologischen Entwicklung wenigstens dreimal im Schneeball-Erde-Zustand befand: zum ersten Mal im Zuge der Makganyene-Vereisung im frühen Proterozoikum (vor ca. 2,3 Mrd. Jahren) sowie während der Sturtischen (720–660 Mill. Jahre) und der Marinoischen Vereisung (650–635 Mill. Jahre) des späten Proterozoikums (s. MESCHEDÉ Kap. 2.1 in diesem Band).

Das Schneeball-Erde-Modell beschreibt einen Zustand der Erde, bei dem die globale Durchschnittstemperatur auf ca. -50°C absank, wobei es am Äquator mit Jahresmitteltemperaturen um -20°C etwa so kalt war wie heute in den hohen Polarregionen. Trotz des kom-

plett gefrorenen Zustandes der Erdoberfläche kam es während dieser Zeit zum Transport von H₂O aus Gebieten mit starker Sublimation (der direkte Übergang von der festen in die gasförmige Phase) in Räume, in denen die Kondensation überwog. Neben dem rein gravitativen Zerfließen des Eiskörpers führte dies zu Unterschieden in der regionalen Gletschermassenbilanz, die durch Eisbewegungen ausgeglichen wurden. Dabei entstanden glaziale Sedimente (Tillite und andere, Diamiktite sowie mächtige glazimarine Abfolgen mit Dropstones etc.), die als Zeugnisse dieser Vergletscherung in vielen Gebieten erhalten geblieben sind (PIERREHUMBERT et al. 2011).

Die durchschnittliche Mächtigkeit der Eisbedeckung während der Schneeball-Erde Vergletscherung wird für die Landflächen, analog zu den rezenten Eisschilden der Antarktis und Grönlands, auf mindestens 3-4 km geschätzt. Für die Ozeane geht man von einer Schelfeismächtigkeit zwischen einigen hundert Metern bis zu einem Kilometer aus. Allerdings deuten Klimabilanzrechnungen darauf hin, dass größere Meeresbereiche in Äquatornähe nur von geringmächtigem Meereis (1-2 m) bedeckt waren. Unter diesen Voraussetzungen (dünnes und klares Meereis) war es möglich, dass photosynthetisierende Organismen unterhalb des Meereises überleben konnten (WARREN et al. 2002).

Mithilfe paläomagnetischer Untersuchungen lässt sich feststellen, auf welcher Paläobreite bestimmte Gesteine entstanden sind. In Sedimenten des späten Proterozoikums ergaben solche Untersuchungen, dass zumindest ein Teil der glazigenen Ablagerungen in Äquatornähe entstanden sind. Auf diesen Daten gründet die Annahme, dass die Erde inklusive der Ozeane zu dieser Zeit bis zum Äquator hin mit Eis bedeckt gewesen sein muss. Über den Ozeanen hatte sich eine

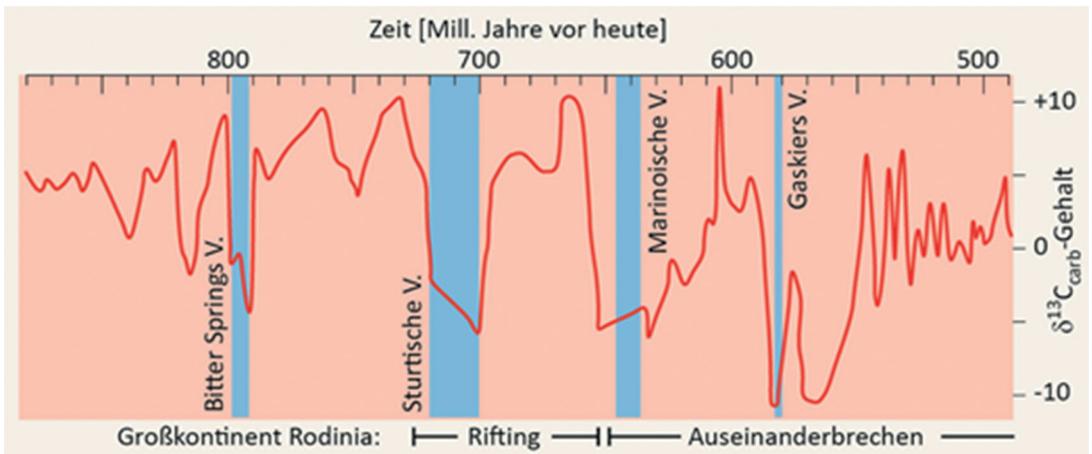


Abb. 2.2-1: $\delta^{13}\text{C}$ -Verhältnis in karbonatischen Sedimenten aus dem späten Proterozoikum (vereinfacht nach HALVERSON et al. 2005).

Meereissschicht gebildet, die nach Modellrechnungen vermutlich über einen Kilometer mächtig war. Andere Autoren nehmen an, dass um den Äquator herum noch ein Gürtel mit offenen Wasserflächen existierte (PIERREHUMBERT et al. 2011). Weitere Hinweise auf eine extreme Vergletscherung dieser Zeit ergeben sich aus Kohlenstoffisotopen-Verhältnissen ($\delta^{13}\text{C}$), die Auskunft über die Intensität der biologischen Aktivität geben. In den glazigenen Sedimenten des späten Proterozoikums ist das $\delta^{13}\text{C}$ -Verhältnis besonders niedrig (Abb. 2.2-1), was als Anzeiger für eine extrem geringe biologische Aktivität und lebensfeindliche Bedingungen gewertet wird (HOFFMANN et al. 1998). Weiterhin wurden in

marinen Sedimenten des Paläoäquators Dropstones gefunden, die vermutlich durch driftende Eisberge oder vom Gletscherschelfeis transportiert wurden. Beim Abschmelzen des Eises über den Ozeanflächen sanken sie zu Boden und werden in die feinkörnigen marinen Sedimente eingebettet.

Allgemein wird vermutet, dass die damalige starke Abkühlung der Erde auf eine deutliche Reduzierung der Treibhausgase (vor allem Kohlendioxid [CO_2] und Methan [CH_4]) zurückzuführen ist. Sowohl zu Beginn als auch am Ende des Proterozoikums konzentrierten sich die kontinentalen Landmassen um den Äquator herum, wo es unter normalen Klimabedingungen

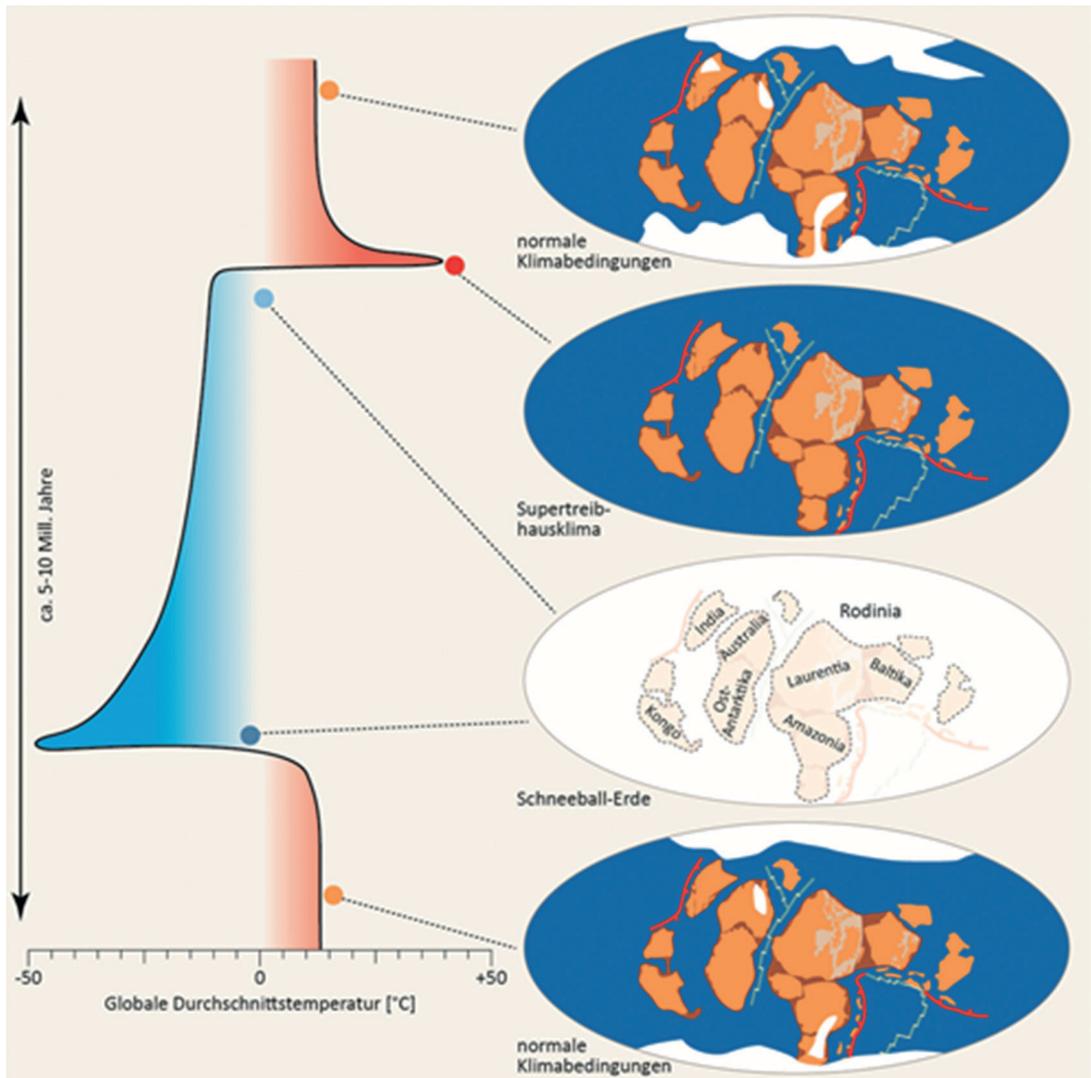


Abb. 2.2-2: Entwicklung des Schneeball-Erde-Zustandes und des Temperaturverlaufes am Ende der Sturtischen Vereisungsphase im späten Proterozoikum vor ca. 660 Mill. Jahren (vereinfacht und verändert nach PIERREHUMBERT 2002, FAIRCHILD & KENNEDY 2007).

heiß und feucht ist. Im frühen Proterozoikum gehörten sie zum vermuteten Großkontinent »Kenorland«, im späten Proterozoikum war dies der deutlich besser dokumentierte Großkontinent »Rodinia«. Eine große Landmasse um den Äquator herum bedeutet, dass es zu dieser Zeit zu intensiver Verwitterung der an der Oberfläche anstehenden Gesteine kam. Bei der Verwitterung von Kalk- und Silikatgesteinen wird der Atmosphäre durch die Bildung von Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) CO_2 entzogen. Dabei werden Calcium-Ionen aus Silikatmineralen (z.B. aus Plagioklas [Ca-Feldspat] oder Augit [Ca-haltiger Pyroxen]) mithilfe von Hydrogenkarbonat herausgelöst und mit dem Wasser abgeführt.

Aus der Existenz sehr ausgedehnter Landoberflächen um den Äquator herum ergeben sich zusätzliche Faktoren, die eine Abkühlung begünstigen. So konnte die Erde gerade dort, wo die Sonneneinstrahlung aufgrund des Sonnenstandes energetisch am größten ist, weniger Wärme aufnehmen, da Landoberflächen im Gegensatz zu den Ozeanen eine höhere Albedo aufweisen (RAUB & KIRSCHVINK 2008). Kein Konsens besteht derzeit über die Konfiguration der atmosphärischen Zirkulationssysteme und der damit verbundenen Niederschlagsdynamik während der neoproterozoischen Schneeball-Erde. Aufgrund der Konzentration fragmentierter Landmassen in tropischen Breiten, d.h. in Gebieten erhöhter Humidität, lässt sich jedoch vermuten, dass die meisten Landgebiete signifikante Niederschlagsmengen erhielten und die klimatische Kontinentalität insgesamt reduziert war. Hinzu kommt, dass die Erde im Proterozoikum insgesamt eine geringere Sonneneinstrahlung erhielt, als dies heute der Fall ist. Die Sonne hat seit ihrer Entstehung vor ca. 4,6 Mrd.

Jahren an Leuchtkraft gewonnen, man geht davon aus, dass die Luminosität der damaligen Sonne etwa 6% geringer war als heute. Zusätzlich verstärkten im Proterozoikum weitere Faktoren, wie große Vulkanausbrüche, durch die große Mengen von Asche in die Atmosphäre gelangten, die Reduktion der Oberflächentemperatur. Schließlich führten Rückkopplungseffekte wie die zunehmende Albedo aufgrund ihrer Multiplikatorenwirkung zur globalen Vereisung. Gleichzeitig liefert der Albedo-Effekt jedoch auch eines der Hauptargumente gegen die Schneeball-Erde-Hypothese: Nach Berechnungen hätte der durch die globale Vergletscherung extrem hohe Albedo-Effekt ein Abschmelzen der Eismassen durch Wärmezufuhr der Sonne und damit eine Rückkehr zu nicht-glazialen Bedingungen weitestgehend unmöglich gemacht. Damit wäre die Erde permanent im Zustand einer Schneeball-Erde verblieben. Da dies nicht der Fall war, bedarf es eines Mechanismus, der, unabhängig von der Menge der zugeführten Sonnenenergie, die globale Eisdecke wieder zum Schmelzen bringt und den Zustand der Schneeball-Erde beendet.

Wahrscheinliche Ursachen sind plattentektonische Bewegungen und Prozesse, die auch bei weitgehend vereister Erdoberfläche und stark reduzierter biologischer Aktivität nicht unterbrochen werden. Damit läuft der geochemische Kohlenstoffzyklus auch unter einer vollständigen Eisbedeckung zumindest zum Teil weiter. Durch die Subduktion von kalkigen und organischen Sedimenten gelangt fortwährend Kohlenstoff in Form von CaCO_3 und Kohlenwasserstoffen (Kohle, Erdöl) in den Bereich hoher Drucke und Temperaturen. CaCO_3 reagiert z.B. mit SiO_2 unter Abspaltung von



Abb. 2.2-3: Spätproterozoische glazial gebildete Diamiktite der Fig-Formation überlagert von Kappadolomiten der Hadaash-Formation im Wadi Haslan, Jebel Akhdar-Gebirge, Oman. Die Diamiktite gehören zur Sturtischen Vereisungsphase.

CO₂ zu Silikatmineralen (z.B. Wollastonit: $3 \text{ CaCO}_3 + 3 \text{ SiO}_2 = \text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9) + 3 \text{ CO}_2$) und organische Bestandteile werden zu Methan umgewandelt. Vulkane über Subduktionszonen setzen das abgespaltene Kohlendioxid und das Methan über vulkanische Gasexhalationen wieder frei.

Auch während des Schneeball-Erde-Zustandes gelangte somit immer wieder Kohlendioxid in großen Mengen in die Atmosphäre. Da es infolge der Vereisung jedoch zu einem weitgehenden Stillstand der Verwitterung auf der Landoberfläche kam, bestand keine Möglichkeit, das freigesetzte Kohlendioxid z.B. durch Silikatverwitterung zu binden (KIRSCHVINK 1992). In der Folge reicherte sich das Treibhausgas in der Atmosphäre allmählich wieder an. Die atmosphärische CO₂-Konzentration erreichte am Ende der globalen Vereisungen im späten Proterozoikum ca. 10%, ein Wert, der um ein Vielfaches höher ist als der heutige CO₂-Gehalt, der lediglich bei 0,04% liegt. Ab einem bestimmten CO₂-Gehalt kippte das bis dahin stabile Klimasystem und es kam zu einer rapiden Erwärmung mit der Entwicklung eines äußerst unruhigen Super-treibhausklimas (ALLEN & ETIENNE 2008). Um genügend CO₂ in der Atmosphäre anzureichern damit die Erde den Schneeball-Zustand wieder verlassen konnte, war ein Zeitraum von mindestens 5 bis 10 Mill. Jahren erforderlich. Als das System jedoch schließlich kippte,

brachte die schnelle Erwärmung den gesamten Eispanzer innerhalb eines kurzen Zeitraumes, der vermutlich nur wenige tausend Jahre dauerte, zum Abschmelzen (Abb. 2.2-2). In der Folge stieg der Meeresspiegel rasant um viele hundert Meter, möglicherweise sogar über einen Kilometer an. Zur rapiden Erwärmung hat vermutlich auch die Freisetzung von Methan, ein noch viel stärkeres Treibhausgas als CO₂, aus Gashydraten beigetragen (KENNEDY et al. 2001). Marine Gashydrate sind nur unter niedrigen Temperaturen in fester Form stabil. Sie zersetzen sich bei warmen Temperaturen unter normalen Druckbedingungen und können große Mengen an Methan innerhalb kurzer Zeit freisetzen.

Das Abschmelzen des Eises setzte zudem die chemischen Verwitterungsprozesse wieder in Gang, so dass das atmosphärische CO₂ wieder gebunden werden konnte. Durch Niederschläge wurde das CO₂ aus der Atmosphäre ausgewaschen und ging als saurer Regen nieder, was die Verwitterung auf der Landoberfläche weiter beschleunigte, während es gleichzeitig im sich erwärmenden Meerwasser weit verbreitet zur Bildung karbonatischer Sedimente kam. Daraus ergab sich eine für das Ende der proterozoischen Vereisungen typische Sedimentabfolge. Direkt auf den glazigenen Sedimenten auflagernd sind heute weltweit dolomitische und kalkige Sedimente zu finden, die als Kappendolomite oder Kappenkarbonate bezeichnet werden (Abb.

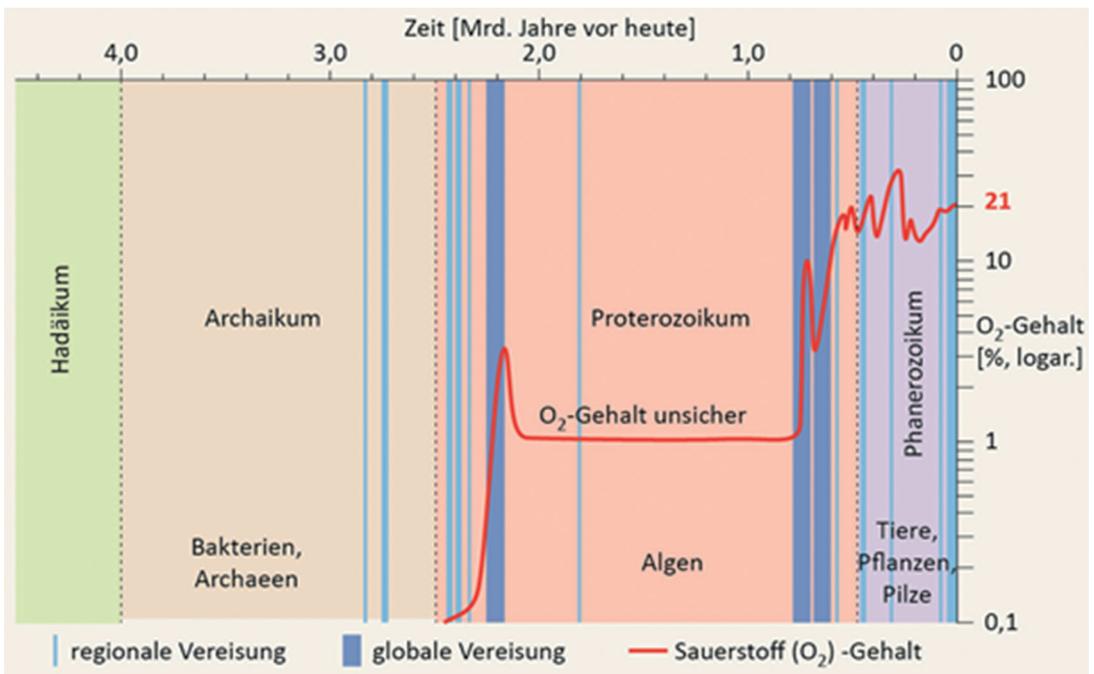


Abb. 2.2-4: Vereisungsphasen und die Entwicklung des Sauerstoffgehaltes im Laufe der Erdgeschichte (verändert nach GOLDBLATT et al. 2006, BERNER 2006, HARADA et al. 2015).

2.2-3). Sie unterscheiden sich von gängigen Karbonaten durch ihre ungewöhnlichen Eigenschaften wie z.T. riesige Wellenrippeln, Mikrobenmatten, vertikale tubulare Strukturen oder frühdiagenetisch gebildeten Baryt (BaSO_4). Sie entstanden auf Karbonatplattformen, auf Schelfen oder an submarinen Hängen und z.T. auch dort, wo es normalerweise nicht zur Ablagerung von Karbonaten kommt und erreichten Mächtigkeiten bis zu 30 m. Die meisten Kappenkarbonate sind transgressiv gebildet worden und zeigen damit die Überflutung der Kontinentränder aufgrund des abschmelzenden Eises an.

Die Vergletscherungen der Schneeball-Erde stehen auch in einem Zusammenhang mit der Zunahme des Sauerstoffgehaltes in der damaligen Atmosphäre. Ein starker Anstieg des Sauerstoffgehaltes ereignete sich nach der frühproterozoischen Makganyene-Vereisung vor ca. 2,4–2,2 Mrd. Jahren (Abb. 2.2-4), wobei sich der Sauerstoffgehalt von einem Wert unter 0,1% auf ca. 1% erhöhte. Im späten Proterozoikum stieg der Sauerstoffgehalt nach den beiden Schneeball-Erde-Vereisungen weiter an und erreichte ein Niveau von etwa 15%. Es wird angenommen, dass es nach der Marinoischen Vereisung ein so reichhaltiges Angebot an Nährstoffen gab, dass es zu einer ausgedehnten Ausbildung von Faulschlamm kam. Die Oxidation der organischen Bestandteile wurde jedoch durch ihre rasche Sedimentation verhindert und der atmosphärische Sauerstoff wurde nicht verbraucht. Er reichte sich deswegen in der Folge in der Atmosphäre an. Dieser erhöhte Sauerstoffgehalt ermöglichte die nach den Vereisungen einsetzende rasante Entwicklung der Lebewelt mit komplexen vielzelligen Organismen, die einen deutlich höheren Energiebedarf hatten, den sie mit dem angebotenen Sauerstoff decken konnten. Somit könnten die Schneeball-Erde-Zustände einen nicht unerheblichen Anteil an der Entwicklung des Lebens auf der Erde gehabt haben.

Literatur

- ALLEN, P. A. & J. L. ETIENNE (2008): Sedimentary challenge to Snowball Earth. - *Nature Geoscience*, 1: 817-825.
- ARNAUD, E., HALVERSON, G. P. & G. SHIELDS-ZHOU (2011): Chapter 1: The geological record of Neoproterozoic ice ages. - *Geol. Soc. London Mem.*, 36: 1-16.
- BERNER (2006): GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O_2 and CO_2 . - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70: 5653-5664.
- FAIRCHILD, I. J. & M. KENNEDY (2007): Neoproterozoic glaciation in the Earth System. - *J. Geol. Soc., London*, 164: 895-921.
- GOLDBLATT, C., LENTON, T. M. & A. J. WATSON (2006): Bistability of atmospheric oxygen and the Great Oxidation. - *Nature*, 443: 683-686.
- HALVERSON, G. P., HOFFMAN, P. F., SCHRAG, D. P., MALOOF, A. C., & A. H. N. RICE (2005): Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. - *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 117: 1181-1207.
- HARADA, M., TAJIKA, E. & Y. SEKINE (2015): Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth. - *Earth Planet. Sci. Lett.*, 419: 178-186.
- HARLAND, W. B. (1964): Critical evidence for a great infra-Cambrian glaciation. - *Int. J. Earth Sci.*, 54: 45-61.
- HOFFMAN, P. F., KAUFMAN, A. J., HALVERSON, G. P. & D. P. SCHRAG (1998): A Neoproterozoic snowball Earth. - *Science*, 281: 1342-1346.
- KENNEDY, M. J., CHRISTIE-BLICK, N. & L. E. SOHL (2001): Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? - *Geology*, 29: 443-446.
- KIRSCHVINK, J. L. (1992): Late Proterozoic low-latitude glaciation: the snowball Earth. - In: Schopf, J. W. & C. Klein (eds.): *The Proterozoic Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge: 51-52.
- PIERREHUMBERT, R. T. (2002): The hydrologic cycle in deep-time climate problems. - *Nature* 419: 191-198.
- PIERREHUMBERT, R. T., ABBOT, D. S., VOIGT, A. & D. KOLL (2011): Climate of the Neoproterozoic. - *Annu. Rev. Earth Sci.*, 39: 417-460.
- RAUB, T. D. & J. L. KIRSCHVINK (2008): A Pan-Precambrian link between deglaciation and environmental oxidation. - In: Cooper, A.K., Barrett, P.J., Stagg, H., Storey, B., Stump, E., Wise, W., and the 10th ISAES editorial team, Hrsg. *Antarctica: A keystone in a changing world*. Proc. 10th Int. Symp. Antarctic Earth Sci.; Nat. Acad. Press, Washington, D.C., USA, 83-90.

Kontakt:

Prof. Dr. Henrik Rother
 Prof. Dr. Martin Meschede
 Universität Greifswald
 Institut für Geographie und Geologie
 Henrik.Rother@uni-greifswald.de

Rother, H. & M. Meschede (2015): Schneeball-Erde – die größte Vereisung der Erdgeschichte. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 37-42. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de - doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.06