

2.5 Anthropozän - Das Ende des Eiszeitalters ?

HENRIK ROTHER

Anthropozän - Das Ende des Eiszeitalters ?: Durch den Menschen verursachte Veränderungen des globalen Klimas sowie der Beschaffenheit der Erdoberfläche, der Ozeane und der Biosphäre haben ein solches Ausmaß erreicht, dass viele Wissenschaftler die Erde am Übergang in ein neues geologisches Zeitalter, das Anthropozän, sehen. Die neue Epoche wird markiert durch zahlreiche Umweltindikatoren, die spätestens seit Mitte des 20. Jahrhunderts weit außerhalb ihrer natürlichen holozänen Schwankungsvariabilität liegen. Dazu zählen vor allem Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und der Ozeane durch anthropogene Emissionen gewaltiger Mengen CO_2 und CH_4 , die Freisetzung industrieller Schadstoffe sowie die Bildung und Freisetzung künstlicher Radionuklide durch die Explosion von über 500 Atombomben in der Atmosphäre zwischen 1945 und 1963. Hinzu kommen weitreichende Veränderungen in der Qualität ökologischer Lebensräume mit drastischen Folgen für die globale Biodiversität. Stratigraphisch resultieren diese Modifikationen in anthropogenen Marker-Horizonten mit charakteristischen lithologischen, geochemischen und paläobiologischen Signaturen, die weit in die geologische Zukunft der Erde erhalten bleiben werden. Als Beginn des Anthropozän und mögliche stratigraphische Grenze wird das Einsetzen der Industriellen Revolution um 1800 in Betracht gezogen. Bislang fehlt jedoch eine Einigung zur Bestimmung der Basis des Anthropozän und die 2008 beantragte formale Anerkennung als chronostratigraphische Einheit durch die International Commission on Stratigraphy (ICS) steht noch aus. Das folgende Kapitel fasst den aktuellen Stand der Debatte zu den Schlüsselindikatoren und zur Chronologie des Anthropozäns zusammen..

Anthropocene: The end of the Ice Age ? Human-induced modifications of the Earth's climate, land surface, oceans and biosphere have become so substantial that many scientists suggest that the Earth is at the transition to a new geological epoch, i.e. the Anthropocene. In this era numerous environmental indicators have shifted beyond the range of their natural Holocene variability at least since the middle of the 20th century. These include changes of the chemical composition of the atmosphere and the oceans through anthropogenic emissions of huge amounts of CO_2 and CH_4 , the release of large amounts of industrial contaminants, as well as the formation and release of artificial radionuclides from the explosion of more than 500 atom bombs in the atmosphere between 1945 and 1963. In addition far-reaching changes of the quality of ecological habitats have significant effects on the global biodiversity. These modifications cause stratigraphic 'marker horizons' with distinct lithological, geochemical and palaeobiological signatures, which will be preserved far into Earth's geological future. The start of the Industrial Revolution around 1800 has been suggested to indicate the onset of the Anthropocene and a possible stratigraphic boundary. However, so far no agreement has been reached on the determination of the basis of the Anthropocene, and the International Commission on Stratigraphy (ICS) has not yet formally accepted it as a chronostratigraphic entity (application of 2008) and possible stratigraphic boundary. The following chapter summarizes the current state of the debate on the key indicators and the chronology of the Anthropocene.

Vermutlich schon früh in der evolutionären Entwicklung des Menschen, jedoch spätestens seitdem die Gattung *Homo* erlernte, das Feuer zu beherrschen und gezielt einzusetzen, begann der Mensch seine natürliche Umwelt zu verändern¹. Diese frühen anthropogene Einflüsse blieben jedoch auf zumeist kleinere Gebiete begrenzt und waren insgesamt von nur geringer Intensität. Erst seit Beginn der Industriellen Revolution in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wird die Rolle des Menschen im System Erde zunehmend dominanter und führt zu markanten Veränderungen der globalen Geo- und Biosphäre. Deutlicher Ausdruck dieser Entwicklung sind anthropogen verursachten Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und der Ozeane, die massiven Eingriffe des Menschen in den terrestrischen Wasserkreislauf durch das Aufstauen von Flüssen² und das sich gegenwärtig vollziehende und mit hoher Wahrscheinlichkeit anthropogen verursachte quartäre Massenaussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten.

Der wirtschaftende Mensch tritt damit als eine »neue« und einflussreiche Naturkraft im System Erde hervor – ein in der Erdgeschichte einmaliges Ereignis. Um dieser fundamentalen Veränderung in der Mensch-Umwelt Beziehung Rechnung zu tragen, schlugen der Atmosphärenchemiker Paul Crutzen und der Paläontologe Eugene Stroemer Anfang der 2000er Jahre vor, die derzeitige geologische Epoche als Anthropozän zu bezeichnen (CRUTZEN & STROEMER 2000, CRUTZEN 2002). Der Begriff ist etymologisch vom griechischen »ánthrōpos« (Mensch) und »kainos« (neu) abgeleitet, und beschreibt konzeptionell, dass die Erde am Ende der natürlich-beeinflussten Phase des Holozäns steht und nunmehr in eine neue, anthropogen dominierte erdgeschichtliche Epoche eintritt. Die litho-, chemo- und biostratigraphischen Spuren dieser neuen Ära sind als markante Zäsur global nachweisbar und werden langfristig, d.h. über geologische Zeiträume, erhalten bleiben. Seit seiner Einführung wird der Anthropozän-Begriff in zunehmendem Maße durch die

populären Medien genutzt und ist das Forschungsthema mehrerer neu verlegter wissenschaftlicher Journale (z.B. The Anthropocene; The Anthropocene Review; Elementa). Im Jahr 2008 folgte der Antrag auf Aufnahme des Anthropozäns als formale geologische Zeitepoche in die Internationale Chronostratigraphische Tabelle (COHEN et al. 2013). Nach initialer Prüfung und Diskussion durch die *International Commission on Stratigraphy* (ICS) wird der Vorschlag derzeit durch die ICS *Subcommission on Quaternary Stratigraphy* bearbeitet, mit einer Beschlussempfehlung wird für das Jahr 2016 gerechnet.

Wann begann das Anthropozän? Da eine formale Entscheidung durch die ICS bislang fehlt, werden aktuell noch mehrere Ansätze diskutiert (Abb. 2.5-1). Unterstützer der »frühen Anthropozän Hypothese« befürworten eine Festlegung des Beginns weit in der

vorindustriellen Ära, als zeitlicher Marker hierfür wurde das Aussterben der pleistozänen Megafauna am Ende der letzten Kaltzeit nominiert (BURNLEY & FLANNERY 2005)³. Andere Vertreter korrelieren den Beginn des Anthropozäns mit der Neolithische Revolution im frühen Holozän, die durch das Aufkommen der Landwirtschaft und das Entstehen erster größerer Siedlungen gekennzeichnet ist. Obwohl unstrittig ist, dass sowohl die Neolithische Revolution als auch das Aussterben der Megafauna erste klare anthropogene Signaturen in den geologischen Daten hinterlassen haben, gibt es keine Hinweise dafür, dass die Funktionsweise des globalen Ökosystems bereits in der vorindustriellen Phase durch den Menschen als Ganzes nachhaltig beeinträchtigt wurde.

CRUTZEN & STROEMER (2000) sowie zahlreiche andere Bearbeiter schlugen daher die Industrielle Re-

¹ Der Zeitpunkt des Beginns der gezielten Feuernutzung durch den Menschen ist umstritten. Die ältesten hinreichend gesicherten Befunde dazu datieren zwischen 790.000-400.000 Jahre vor heute, jedoch gibt es indirekte Hinweise, die auf eine Feuernutzung durch *Homo erectus* bereits vor ca. 1,5 Mio. Jahren hindeuten.

² Weltweit existieren ca. 45.000 große Staudämme und etwa die Hälfte aller Flüsse der Erde wird durch Wasserbauwerke aufgestaut (DUFLO & PANDE 2007).

³ Hierbei handelt es sich um das Aussterben erheblicher Anteile der Großtierfauna in Australien, Nord- & Südamerika, Südasien und im nördlichen Eurasien zwischen etwa 50.000-10.000 Jahren vor heute (u.a. Säbelzahnkatzen, Riesenkänguru, Wollhaarnashorn, Mammut). In den genannten Gebieten starben alle Tierarten mit einem Körpergewicht über 1.000 kg und 80% aller Arten mit einem Körpergewicht zwischen 100-1.000 kg aus. Zwar hält die wissenschaftliche Debatte über die Hauptursache des Verschwindens der Megafauna an, es besteht jedoch weitgehend Konsens darüber, dass der Niedergang der Großtierfauna in fast allen Fällen zeitlich mit dem Vordringen des modernen Menschen zusammenfällt und dass anthropogener Jagddruck am Untergang der Megafauna maßgeblich beteiligt war.

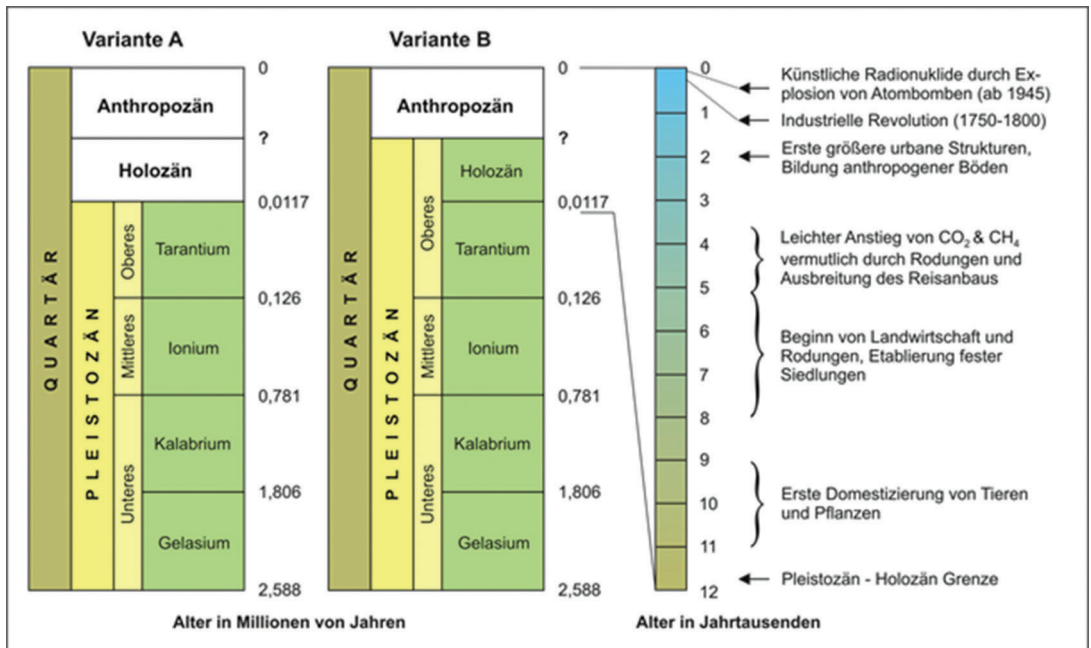


Abb. 2.5-1: Geologische Zeitskala des Quartärs mit zwei Optionen für die noch ausstehende formale chronostratigraphische Definition des Anthropozäns (nach LEWIS & MASLIN 2015). Der Zeitstrahl rechts zeigt bedeutende Einschnitte in der Mensch-Umwelt-Beziehung der letzten 12.000 Jahre, die als mögliche Holozän – Anthropozän Grenze diskutiert werden (nach SMITH & ZEDER 2013).

volution, beginnend in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, als Startpunkt für das Anthropozän vor. Mit dieser Phase setzte ein bis heute anhaltendes rapides Bevölkerungswachstum ein, welches vom drastischen Anstieg im Verbrauch fossiler Brennstoffe begleitet wurde. So wuchs die Weltbevölkerung zwischen 1800 und 2000 von einer auf sechs Milliarden Menschen, im selben Zeitraum erhöhte sich der globale Energieverbrauch um das 40-Fache (MCNEILL 2000). Der Anstieg der Emission von CO₂ und dessen Konzentrationszunahme in der Atmosphäre sind insgesamt ein guter Indikator für die Entwicklung des Anthropozäns. Dennoch eignet sich das CO₂-Signal aus stratigraphischer Sicht nur bedingt für eine präzise Festlegung der Anthropozän-Basis, da eine merkliche Zunahme der atmosphärischen Konzentration erst mit einiger Verzögerung nach Beginn der Industrialisierung zu verzeichnen ist. So lag der atmosphärische CO₂-Gehalt im Jahr 1750 bei 277 ppm und stieg bis 1825 nur geringfügig auf 283 ppm an. Beide Werte befinden sich noch innerhalb der natürlichen CO₂ Schwankungsvariabilität des Holozäns (zwischen 260-285 ppm), erst um 1900 wurde die Marke von 300 ppm CO₂ überschritten (STEFFEN et al. 2011). Diese erste Phase des Anthropozäns, gekennzeichnet durch die allmähliche, aber stetige Zunahme menschlicher Umwelteinflüsse ab ca. 1800, wird um ca. 1950 von einer zweiten Phase der zunehmenden Intensivierung und Beschleunigung anthropogener Umweltveränderungen abgelöst. Die drastischen Auswirkungen dieser als »Great Acceleration« (STEFFEN et al. 2004) bezeichneten Periode lassen sich anhand zahlreicher Schlüsselindikatoren dokumentieren (s. Abb.2.5-2):

- Zunahme der Weltbevölkerung um 4,8 Mrd. Menschen innerhalb von nur 65 Jahren von 2,5 Mrd. in

1950 auf 7,3 Mrd. in 2015. Im gleichen Zeitraum erhöhte sich der Anteil der Stadtbevölkerung von 27% auf 53% (ZALASIEWICZ et al. 2015), die Anzahl der Kraftfahrzeuge auf der Erde wuchs von 40 Mio. am Ende des 2. Weltkrieges auf 1,1 Mrd. in 2012 (DAVIS et al. 2014).

- Anstieg der CO₂ Konzentration in der Atmosphäre um 90 ppm, von 311 ppm im Jahr 1950 auf 401 ppm in 2015. Im Vergleich zum vorindustriellen Niveau ist der aktuelle CO₂-Gehalt der Atmosphäre um ca. 40% erhöht, der rezente Wert ist damit der höchste während der letzten 800.000 Jahre, vermutlich sogar während der letzten 2-3 Mio. Jahre. Deutliche Konzentrationszunahmen sind auch für die Treibhausgase wie Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) sowie Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) zu verzeichnen. Die kausale Beziehung zwischen zunehmender Treibhausgas-Konzentration und globaler Klimaerwärmung ist detailliert dokumentiert und gilt als wissenschaftlich gesichert (IPCC 2013).
- Versauerung der Ozeane durch eine erhöhte CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre. Circa 30% des während der letzten fünf Jahrzehnte anthropogen emittierten Kohlenstoffdioxids ist durch die Weltmeere absorbiert worden (LE QUÉRÉ et al. 2009). Dies dämpft zwar den (sonst noch stärkeren) anthropogenen Treibhauseffekt, führt aber aufgrund erhöhter CO₂-Lösung im Wasser zur problematischen Abnahme des Meeresswasser pH-Wertes. Im Vergleich zum vorindustriellen Niveau sank der global gemittelte pH-Wert der Ozeane bislang um ca. 0,11 Einheiten (JACOBSEN 2005). Daraus resultiert eine zunehmende Untersättigung des Meeresswassers in Bezug auf CaCO₃ mit weitreichend negativen Folgen für viele kalkskelettbildende Organismen (z.B.

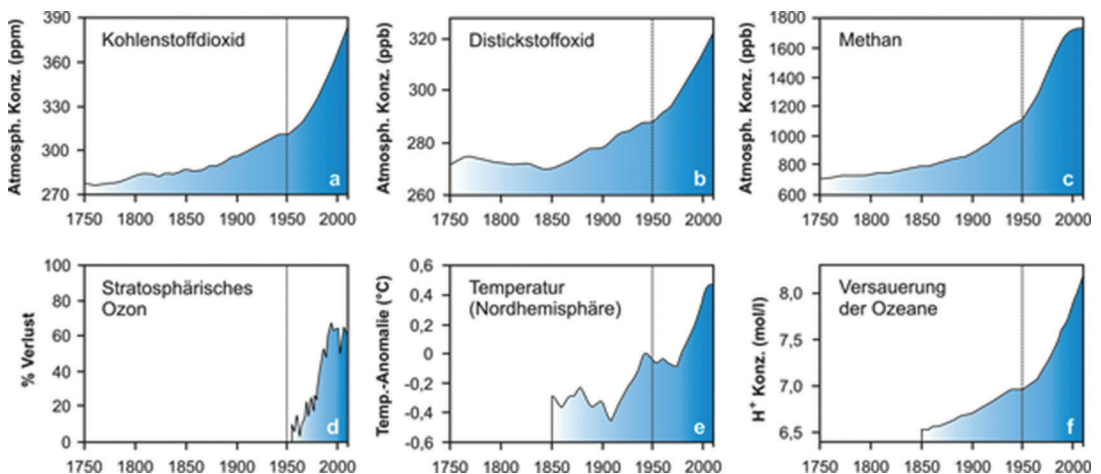


Abb. 2.5-2: Veränderungen zwischen 1750 und 2010 dargestellt anhand ausgewählter Schlüsselindikatoren. Deutlich erkennbar ist die Beschleunigung anthropogener Umwelteinwirkungen nach 1950 (nach STEFFEN et al. 2015).

- Korallen und Teile des marinen Planktons) sowie die Biodiversität mariner Ökosysteme.
- Hohe Belastung von Luft, Boden und Gewässern durch Nähr- und chemische Schadstoffe. Der künstliche Eintrag signifikanter Mengen von Kontaminanten durch industrielle Aktivitäten und intensiver Landwirtschaft resultiert in markanten geochemischen Anomalien. Dazu zählen die Verdopplung des Gehalts an reaktivem Stickstoff in erdoberflächennahen Schichten durch den Einsatz von Stickstoffdüngern seit dem frühen 20. Jahrhundert und signifikante Anreicherungen vieler Spurenmetalle besonders von Blei, Quecksilber, Cadmium, Chrom, Kupfer, Zink und Antimon in zahlreichen Sedimenten (GALUSZKA et al. 2014).
 - Freisetzung künstlich erzeugter Radionuklide durch die Explosion von allein 512 Atombomben in der Atmosphäre und unter Wasser seit 1945. Die dabei gebildeten künstlichen Isotope Cäsium-137, Plutonium-239, Plutonium-240 und Americium-241 sind weltweit in jungen Sedimenten und Gletschereis detektierbar (Abb. 2.5-3). Bis zum Verbot von Kernwaffentests in der Atmosphäre im Jahr 1963 (Partial Test Ban Treaty) kam es darüber hinaus zu einer deutlichen Erhöhung der atmosphärischen ^{14}C -Konzentration. Der resultierende » ^{14}C -bomb-peak« ist in allen Kohlenstoffreservoirs, die sich aus atmosphärischem Kohlenstoff speisen, nachweisbar und wird unter Zugrundelegung der Halbwertszeit von ^{14}C (5.730 a) auch in 50.000 Jahren noch nachweisbar sein.
 - Verringerung der ökologischen Qualität vieler mariner und terrestrischer Lebensräume mit erheblichen Folgen für die Biodiversität. Zudem führen menschliche Aktivitäten zum geographischen Transfer (Einschleppung) invasiver Spezies und zur Vermischung

nativer mit nicht-nativen Arten. Markante Erhöhung der Aussterberate in Fauna und Flora. Zusammen genommen werden diese anthropogenen Einflüsse ein deutliches biostratigraphisches Signal im geologischen Record hinterlassen.

- Bildung großer Mengen künstlicher Sedimente sowie Modifikation natürlicher depositioneller Systeme durch Eingriffe des Menschen. Die Lithostratigraphie des Anthropozäns umfasst sowohl direkt anthropogene Materialien (u.a. Beton, Asphalt, Bauschutt sowie deponierte Plasteabfälle) als auch indirekt anthropogen-sedimentäre Signale. Letztere schließen u.a. veränderte Sedimentationsmuster infolge von Rodungen und inadäquater Landnutzung, durch das Aufstauen von Fließgewässern und selbst durch die anthropogene Veränderung des Meeresbodens durch Schleppnetzfischerei mit ein (ZALASIEWICZ et al. 2015).

Die formale Anerkennung des Anthropozäns als neue geologische Epoche bedarf der Festlegung klarer chronostratigraphischer Grenzen, die üblicherweise durch lithologische, geochemische oder paläobiologische Veränderungen markiert werden. In der Geologie werden solche Grenzen durch einen sogenannten GSSP (*Global Stratotype Section and Point*) gekennzeichnet. Für das Holozän zum Beispiel wird der offizielle GSSP (Beginn des Holozäns) an abrupten Veränderungen der Deuterium (δD) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopenverhältnisse in 1492 m Tiefe des Grönländischen NorthGRIP Eiskerns fixiert, die auf 11.650 ± 99 Jahre vor heute datieren (WALKER et al. 2009). Diese isotopischen Veränderungen repräsentieren markante klimatische Veränderungen infolge der Umorganisation atmosphärischer und ozeanischer Zirkulationen in der Nordhemisphäre am Ende der Jüngeren Dryas. Der wohl bekannteste GSSP liegt an der Kreide-Paläogen-Grenze (K-Pg),

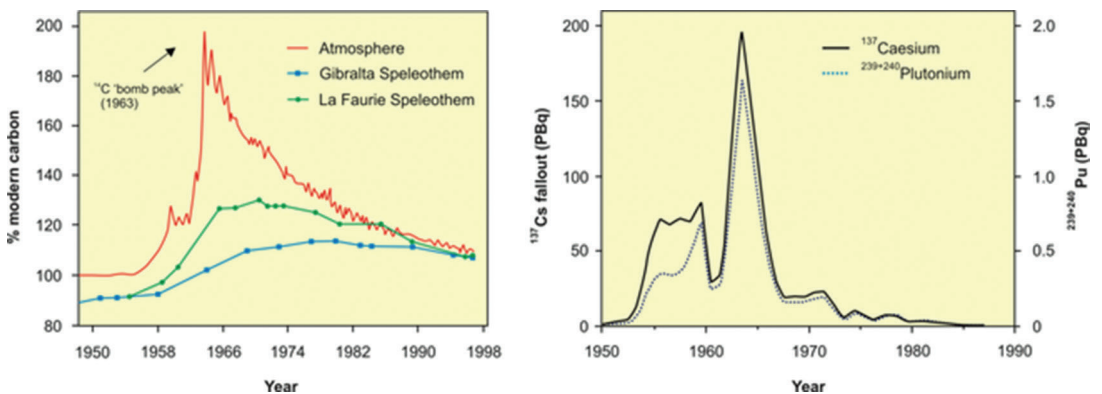


Abb. 2.5-3: Zunahme von Radiokohlenstoff (^{14}C) in der Atmosphäre der Nordhemisphäre (Diagramm links) sowie in Tropfsteinen (Speleotheme) ausgelöst durch die Detonation von Nuklearwaffen (FAIRCHILD & FRISIA 2014). Das Diagramm rechts zeigt den radioaktiven Niederschlag von ^{137}Cs und $^{239+240}\text{Pu}$ in Eiskernen, ebenfalls primär verursacht durch Kernwaffentests in der Atmosphäre (HANCOCK et al. 2014).

welche mit dem Niedergang der Dinosaurier und dem Aufstieg der Säugetiere am Beginn der Känozoikums verbunden ist. Hier wird der offizielle GSSP durch eine weltweit nachweisbare Anreicherung des auf der Erde seltenen Elements Iridium – verursacht durch den Einschlag eines extraterrestrischen Impaktkörpers – markiert. Als Typuslokalität für den GSSP der K-Pg Grenze dienen 66 Mio. Jahre alte marine Gesteinsschichten bei El Kef in Tunesien (MOLINA et al. 2006).

Hinsichtlich der noch ausstehenden Definition eines globalen GSSP für das Anthropozän unterstützt die Mehrheit der ICS *Anthropocene Work Group* derzeit eine Festlegung auf den Beginn des Atomzeitalters, markiert durch das erstmalige Auftreten künstlicher Radionuklide in der Umwelt. Ein Vorschlag dazu fixiert den Beginn des Anthropozäns auf den exakten Zeitpunkt der ersten Explosion einer Atombombe, dem Trinity Test in New Mexico (USA) am 16. Juli 1945 um 11:29 Uhr Greenwich Mean Time (ZALASIEWICZ et al. 2015). Als alternativer GSSP käme auch der durch Kernwaffen induzierte globale Höhepunkt der atmosphärischen ^{14}C Konzentration des Jahres 1964 in Frage, der in zahlreichen sedimentären Abfolgen nachweisbar ist (LEWIS & MASLIN 2015). Korrelierte Isotopen-Marker, die ebenfalls im Zusammenhang mit Kernwaffentests stehen, sind das $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ Verhältnis sowie Konzentrationsänderungen der Isotope ^{137}Cs (Halbwertszeit 30 Jahre) und des Isotops ^{129}I , welches aufgrund seiner langen Halbwertszeit (15,7 Mio. a) in vielen Sedimenten bis weit in die geologische Zukunft erhalten bleiben wird.

Seit nunmehr 2,6 Mio. Jahren befindet sich die Erde im Eiszeitalter des Quartärs und es stellt sich abschließend die Frage, ob das Anthropozän die das Quartär kennzeichnende Abfolge von Kaltzeiten (sog. »Glazialen«) und dazwischenliegenden Warmzeiten (sog. »Interglazialen«) grundlegend verändern wird? Motor der natürlichen Zyklizität sind geringfügige periodische Variationen im Orbit der Erde, welche die Form des Erdorbits (elliptisch bis zirkulär) sowie den Neigungswinkel und die Ausrichtung der Erdachse betreffen und somit die Energiemenge (W/m^2) der Sonneneinstrahlung auf der Erde beeinflussen. Zum Beginn einer Kaltzeit und dem allmählichen Anwachsen gewaltiger Eisschilde kam es in der Vergangenheit stets dann, wenn die Sommereinstrahlung durch orbitale Veränderungen auf ein Minimum sank und damit das Abtauen der winterlichen Schneefälle stark reduzierte. Geologische Datierungen zeigen, dass die Glaziale des Quartärs im Schnitt ca. 100.000 Jahre andauerten, während die meisten Interglaziale ca. 10.000 Jahre währten. Da letzteres bereits dem Alter der aktuellen Warmzeit (Holozän-Interglazial) entspricht, ist bei Annahme gleichlanger Interglazial-Zeit-

dauern in früheren Studien von einem natürlichen Ende des rezenten Interglazials in wenigen tausend Jahren ausgegangen worden (KUKLA et al. 1972).

Zu gänzlich anderen Schlüssen kommen jedoch neuere Berechnungen und Modellierungen, die sowohl die zukünftige orbitale Konfiguration der Erde als auch verschiedene anthropogen bedingte Treibhauszenarien in Abhängigkeit von der atmosphärischen CO_2 -Konzentration berücksichtigen. Bereits aufgrund der natürlichen orbitalen Parameter ergeben sich demnach für die nächsten 25.000 Jahre nur vergleichsweise geringe Schwankungen hinsichtlich der auf der Erde eintreffenden solaren Einstrahlung. Ursächlich dafür ist die auf absehbare Zeit niedrige Elliptizität des Erdorbits um die Sonne, der im Zuge der nächsten 25.000 Jahre sogar zunehmend zirkulärer wird (sog. »niedrige Exzentrizität«). Allein aufgrund der natürlichen orbitalen Bedingungen wird das Holozän daher vermutlich zu einem ungewöhnlich langen Interglazial, mit dessen Ende erst in mehr als 50.000 Jahre zu rechnen ist (LEDLEY 1995).

Welche Rolle spielt nun der anthropogen beförderte Treibhauseffekt, der als wichtiger klimaenergetischer Faktor die orbitalen Trends überlagert? Unter den »normalen« Bedingungen vergangener Interglaziale stieg die CO_2 Konzentration der Atmosphäre nicht über 290 ppm, zudem zeigen Rekonstruktionen aus Eiskernen, dass sich der atmosphärische CO_2 -Gehalt gegen Ende eines Interglazials jeweils um 10-50 ppm verringerte. In keinem einzigen Fall kam es während der vergangenen 800.000 Jahre zum Einsetzen eines Glazials oberhalb von 260 ppm CO_2 (TZEDAKIS et al. 2012). Der aktuelle CO_2 Gehalt der Atmosphäre liegt bereits heute über 400 ppm und wird unter Berücksichtigung derzeitiger Trends in absehbarer Zeit vermutlich auf 500-700 ppm ansteigen. Simulationen mithilfe numerischer Klimamodelle legen nahe, dass unter diesen Voraussetzungen der auslösende Schwellenwert für den Eintritt in das nächste Glazial im Laufe der nächsten 50.000, möglicherweise sogar 100.000 Jahre, nicht erreicht wird (ARCHER 2009, WOLFF 2014). Sollte die zu erwartende anthropogene Klimaerwärmung der näheren Zukunft sogar zum vollständigen Abschmelzen der Eisschilde Grönlands und der Antarktis führen, könnte die Erde in einen dauerhaft stabilen nicht-glazialen Zustand eintreten. In diesem Falle würde das Anthropozän das Ende der quartären Eiszeit und den Übergang in ein neues geologisches Zeitalter markieren.

Literatur

- ARCHER, D. (2009): The long thaw – how humans are changing the next 100,000 years of Earth's climate. Princeton University Press, 180 pp.
 BERGER, A. & M. F. LOUTRE (2002): An exceptionally long interglacial ahead? *Science* 297: 1287-1288.
 BURNEY, D. A. & T. F. FLANNERY (2005): Fifty millennia of

- catastrophic extinctions after human contact. *Trends in Ecology & Evolution* 20: 395-401.
- COHEN, K. M., FINNEY, S. C., GIBBARD, P. L. & J.-X. FAN (2013; updated): The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36: 199-204.
- CRUTZEN, P. J. & E. F. STOERMER (2000): The Anthropocene. *Global Change Newsl.* 41, 17-18.
- CRUTZEN, P. J. (2002): Geology of mankind: the Anthropocene. *Nature* 415, 23.
- DAVIS, S. C., DIEGEL, S. W. & R. G. BOUNDY (2014): *Transportation Energy Data Book* (vol. 33). Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, 429 pp.
- DUFLO, E. & R. PANDE (2007): Dams. *Quarterly Journal of Economics* 122: 601-646.
- FAIRCHILD, I. & S. FRISIA (2014): Definition of the Anthropocene: a view from the underworld. *Geological Society of London Special Publications* 395: 239-254.
- GALUSZKA, A., MIGASZEWSKI, Z. M. & J. ZALASIEWICZ (2014): Assessing the Anthropocene with geochemical methods. *Geological Society of London Special Publications* 395: 221-239.
- HANCOCK, G. J., TIMS, S. G., FIFIELD, K. L. & I. T. WEBSTER (2014): The release and persistence of radioactive anthropogenic nuclides. *Geological Society of London Special Publications* 395: 265-281.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, 1535 pp.
- JACOBSON, M. Z. (2005): Studying ocean acidification with conservative, stable numerical schemes for non-equilibrium air-ocean exchange and ocean equilibrium chemistry. *Journal of Geophysical Research* 110, D07302, doi:10.1029/2004JD005220.
- KUKLA, G. J., MATTHEWS, R. K. & J. M. MITCHELL (1972): The end of the present interglacial. *Quaternary Research* 2: 261-9.
- LEDLEY, T. S. (1995): Summer solstice solar radiation, the 100 kyr Ice Age cycle, and the next Ice Age. *Geophysical Research Letters* 22: 2745-2748.
- LE QUÈRE, C., RAUPACH, M. R., CANADELL, J. G., MARLAND, G., BOPP, L., CIAIS, P., CONWAY, T. J., DONEY, S. C., FEELY, R. A., FOSTER, P. et al. (2009): Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2: 831-836.
- LEWIS, S. L. & M. A. MASLIN (2015): Defining the Anthropocene. *Nature* 519: 171-180.
- MCNEILL, J. R. (2000): Something new under the sun: an environmental history of the twentieth century world. London, UK: W.W. Norton, 421 pp.
- MOLINA, E., ALEGRET, L., ARENILLAS, I., ARZ, J. A., GALLALA, N., HARDENBOL, J., SALIS, K. VON, STEURBAUT, E., VANDENBERGHE, N. & D. ZAGH-BIB-TURKI (2006): The global boundary stratotype section and point for the base of the Danian stage (Paleocene, Paleogene, 'Tertiary', Cenozoic) at El Kef, Tunisia—original definition and revision. *Episodes* 29, 263–273.
- SMITH, B. D. & M. A. ZEDER (2013): The onset of the Anthropocene. *Anthropocene* 4: 8-13.
- STEFFEN, W., SANDERSON, A., TYSON, P. D., JÄGER, J., MATSON, P. A., MOORE III, B., OLDFIELD, F., RICHARDSON, K., SCHELLNHUBER, H. J., TURNER, B. L. & R. J. WASSON (2004): *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. The IGBP Book Series. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 336 pp.
- STEFFEN, W., GRINEVALD, J., CRUTZEN, P. & J. MCNEILL (2011): The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society (A)* 369: 842-867.
- STEFFEN, W., BROADGATE, W., DEUTSCH, L., GAFFNEY, O. & C. LUDWIG (2015): The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2: 81-98.
- TZEDAKIS, P. C., WOLFF, E. W., SKINNER, L. C., BROVOKIN, V., HODELL, D.A., MCMANUS, J. F. & D. RAYNAUD (2012): Can we predict the duration of an interglacial? *Climate of the Past* 8: 1473-1485.
- WALKER, M., JOHNSEN, S., RASMUSSEN, S. O., POPP, T., STEFFENSEN, J. P., GIBBARD, P., HOEK, W., LOWE, D., ANDREWS, J. et al. (2009): Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journal of Quaternary Science* 24: 3–17.
- WOLFF, E. W. (2014): Ice sheets and the Anthropocene. *Geological Society of London Special Publications* 395: 255-263.
- ZALASIEWICZ, J., WATERS, C. N., WILLIAMS, M., BARNOSKY, E. D., CEARRETA, A., CRUTZEN, P., ELLIS, E., ELLIS, M. E., FAIRCHILD, I.J. et al. (in press) (2015): When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International*.

Kontakt:

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

Rother, H. (2015): Anthropozän - Das Ende des Eiszeitalters ? In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. pp. 57-62. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de - doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.09