Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 71 (2013)
Heft: 378

Artikel: Eiszeiten (Teil 1) : Entdeckung und Erforschung
Autor: Blatter, Heinz
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-897661

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eiszeiten (Teil 1)

Entdeckung und Erforschung

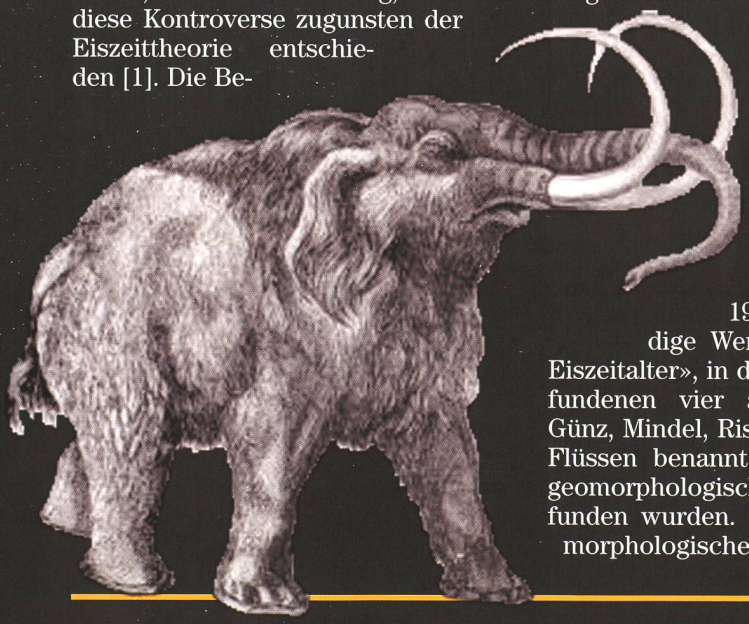
Die Entdeckung, Erforschung und Erklärung der Eiszeiten ist ein spannendes Kapitel der Erdwissenschaften. Verschiedenartig geomorphologische Beobachtungen haben darauf hingewiesen, dass die Vereisung von Eurasien und Nordamerika früher viel grösser war als heute.

Von Heinz Blatter

Abbildung 1: Ein mächtiger Eisschild bedeckte vor 18'000 Jahren die Nordhalbkugel der Erde. (Quelle: Wikipedia / Thomas J. Crowley /Global Biogeochemical Cycles, Vol. 9, 1995, pp. 377-389)

Die Entdeckung der Eiszeiten hat jahrzehntelange Konflikte zwischen verschiedenen Deutungen der Befunde ausgelöst. Als Beispiel wurde um die Herkunft der Findlinge gestritten. Einzelne Wissenschafler sahen darin sogenannte «dropstones», Steine, die im Meereis in das damals noch meerbedeckte Europa gebracht wurden und beim Schmelzen des Eises auf den Meeresgrund sanken. Die Plutonisten deuteten die Findlinge als Auswurf aus Vulkanen. Eine Gruppe von Wissenschaftlern sahen darin Steine, die auf grossen Gletschern gebracht wurden und beim Schmelzen der Gletscher auf dem Boden deponieret wurden. Erst nach dem Vortrag von Louis Agassiz (1807-1873) an der Jahresversammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, 1837 in Neuenburg, wurde diese Kontroverse zugunsten der Eiszeittheorie entschieden [1]. Die Bezeichnung «Eiszeiten» geht auf Karl Friedrich Schimper (1803-1867) zurück.

Die Erforschung der Eiszeiten beruhte wesentlich auf geomorphologischen Beobachtungen, die erlauben, die geographische Ausdehnung der Eismassen zu rekonstruieren. Da unsere Landschaft wesentlich von den Gletschern geformt wurde, gibt es reichlich Spuren, die die Rekonstruktion der Gletscherstände und teilweise die Höhen der Vereisung erlauben. Die vielleicht markantesten Spuren sind die Endmoränen der Höchststände und die Terrassierung an den Rändern der vergletscherten Täler, die verschiedene Gletschervorstösse zu identifizieren erlauben. Eduard Penck (1858-1945) und Eduard Brückner (1858-1945) publizierten zwischen 1901 und 1909 das dreibändige Werk «Die Alpen im Eiszeitalter», in dem die damals gefundenen vier alpinen Eiszeiten Günz, Mindel, Riss und Würm nach Flüssen benannt wurden, wo die geomorphologischen Hinweise gefunden wurden. Die Fülle an geomorphologischen Beobachtungen weltweit erlaubt uns heute, ein zuverlässiges Bild über die Ausdehnung der Vergletscherung in Eurasien und Nordamerika zu erhalten (Abb. 1 und 2), die den grössten Teil der Änderungen in der Eismasse im Laufe der Eiszeitzyklen ausmachten. Zur Zeit des letzten Glazialen Maximums waren 32% der Landoberfläche der Erde mit Eis bedeckt, heute sind es etwa 10%.



Da die Eismächtigkeit keine direkten Spuren hinterlässt, musste das Volumen der Eismassen auf anderen Wegen ermittelt werden. Dazu dienen Rekonstruktionen des Meeresspiegels mit Hilfe von Bohrkernen in Korallenstöcken (Abb. 3). Zusätzlich können die Analysen von stabilen Sauerstoffisotopen in Bohrkernen aus Meeressedimenten Information über das Eisvolumen auf der Erdoberfläche geben. Die Variationen des Gehaltes des Sauerstoffisotops ^{18}O in den sedimentierten benthischen Foraminiferen widerspiegeln das Eisvolumen und dessen Änderungen auf der Erdoberfläche. Die Eiszeiten der letzten 500'000 Jahre sind gekennzeichnet durch ein graduelles Anwachsen des Eisvolumens während etwa 100'000 Jahren in 4 bis 5 Zyklen und einem relativ schnellen Verschwinden der Eisschilde in Nordamerika und Europa in etwa 10'000 Jahren (Abb. 4). Eine überzeugende Er-

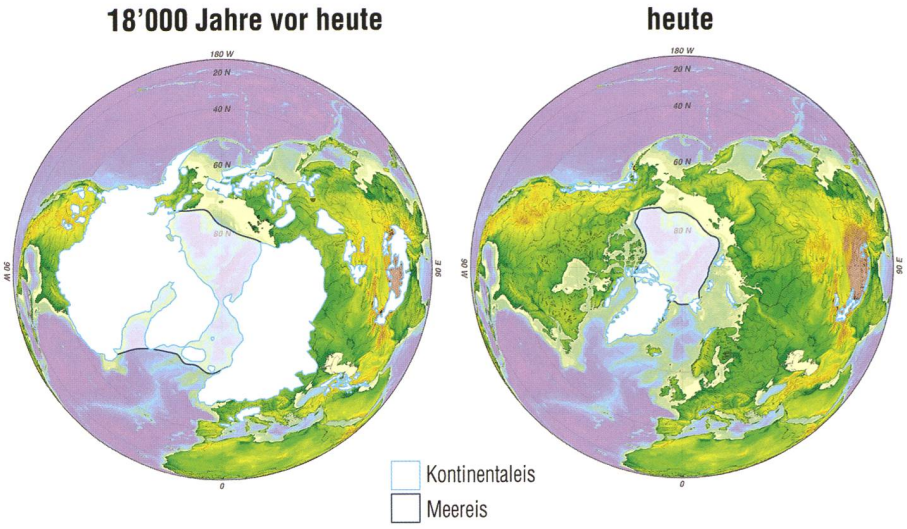


Abbildung 2: Heute ist der Eisschild so gut wie verschwunden. (Bearbeitete Grafik: Thomas Baer)

klärung der Eiszeiten müsste also die Mechanismen dieses Musters der Vereisungen, manchmal Sägezahnmuster genannt, identifizieren können.

Die Milanković-Theorie der Eiszeiten

Die ersten Vorschläge, dass die Eiszeiten durch Variationen der Sonnenstrahlung bewirkt wurden, wurden schon im 19. Jahrhundert gemacht. Der französische Mathematiker Joseph-Alphonse Adhémar (1797-1862) schlug als erster astronomische Ursachen, nämlich die Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne, für die Entstehung der Eiszeiten vor. Der schottische Naturforscher James Croll (1821-1890) publizierte seine Idee, dass ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Eiszeiten und Veränderungen in der Erdumlaufbahn bestünde, 1864 im Philosophical Magazine. Als Ursachen dieser Änderungen wurden die Variationen der Exzentrizität der Erdbahn, der Schiefe der Erdachse und der Jahreszeit des Periheldurchganges der Erde auf ihre Bahn identifiziert. Der serbische Mathematiker Milutin Milanković (1879 -1958) hat 1941 in einem umfassenden Werk, «Der Kanon der Erdbestrahlung» [2], vorgeschlagen, dass die Sonnenstrahlung im Sommer auf 65 Grad Nord wesentlich die Kalt- und Warmzeiten, und damit die Ausdehnung der Eismassen im hohen Norden, geprägt hat.

Um seine Theorie zu belegen, hat er die Elemente der Erdbahn und Erdrotation über die letzten mehreren Hunderttausend Jahre mit Störungsrechnung berechnet (Abb. 5), wohlbemerkt noch ohne leistungsfähige Rechner. Milanković wurde heftig bestritten und er hat die Anerkennung der Theorie, die heute seinen Namen trägt, nicht mehr erlebt. Der Durchbruch seiner Theorie folgte nach 1972 und beruhte auf den Analysen der ersten Bohrkerne, die aus Meeressedimenten gewonnen wurden. Die Variationen des Gehaltes des Sauerstoffisotops ^{18}O in den benthischen Foraminiferen als Approximation des Eisvolumens auf der Erdoberfläche zeigten die gleichen ungefähr 20'000-, 40'000- und 100'000-jährigen Perioden wie

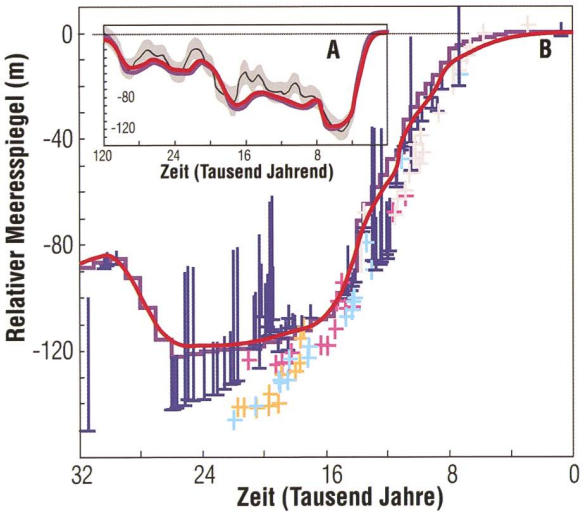


Abbildung 3: Anstieg des Meeresspiegels seit dem letzten glazialen Maximum, rekonstruiert mit Hilfe von Bohrkernen aus Korallenstöcken. (Bearbeitete Grafik nach IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4): Thomas Baer)

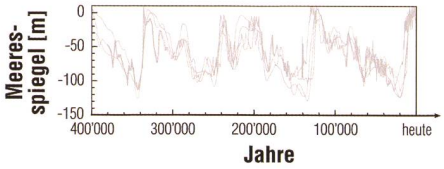


Abbildung 4: Vier Rekonstruktionen der Änderungen des Eisvolumens, gezeigt als entsprechende Änderungen des Meeresspiegels, in den letzten 400'000 Jahren. Die Rekonstruktionen basieren auf Analysen der Variationen des Gehaltes des stabilen Sauerstoffisotopes ^{18}O in Bohrkernen aus Meeressedimenten. (Grafik: The University of Tokyo)

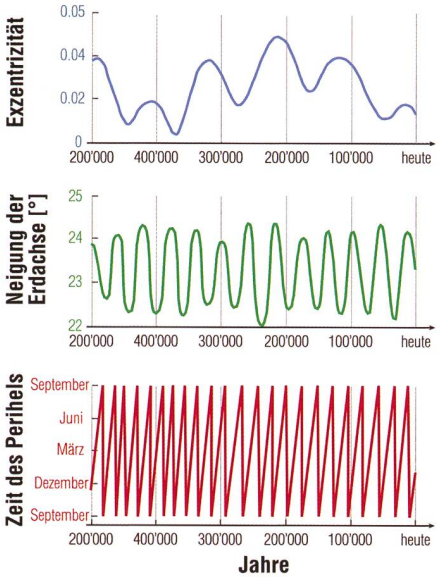


Abbildung 5: Exzentrizität (oben), Schiefe der Erdachse (Mitte) und Zeitpunkt des Perihels (unten) in den letzten 200'000 bis zur Gegenwart. Eine Perihellänge von 90 Grad bedeutet einen Periheldurchgang zur Nordwinter-Sonnenwende, 180 Grad im Frühling, 270 zur Sommersonnenwende und 360 Grad im Herbst. Die Schwankungen der Exzentrizität zeigen eine deutliche 100'000 und 400'000 und die Schiefe der Erdachse eine 40'000 Jahre Periodizität. (Grafik nach Heinz Blatter: Thomas Baer)

die von Milanković gerechneten astronomischen Elemente. Der Zeitpunkt des Periheldurchganges der Erde wandert in etwa 20'000 Jahren einmal durch den Jahreszyklus, die Schiefe der Erdachse schwankt in etwa 40'000 Jahren um ±1 Grad und die Exzentrizität schwankt in etwa 100'000 Jahren zwischen Werten von weniger als 0.001 bis zu Werten zwischen 0.04 und 0.06 (vergl. dazu Abb. 5). Die globalen und jährlichen Mittelwerte der Sonneneinstrahlung schwanken dabei nur sehr wenig

Abbildung 6: Spektakuläre Piedmontgletscher oder Vorlandgletscher im Nordwesten des Surprise Fjord (hinten sichtbar) auf Axel Heiberg Island in Kanada. Das Bild entstand am 24. August 1977. Es zeigt augenfällig, dass Gletschereis wie eine sehr viskose Flüssigkeit unter dem eigenen Gewicht fliessen kann. (Bild: Jürg Alean)

(im Promillebereich), hingegen sind die Schwankungen der Einstrahlung in hohen Breitengraden im Sommer bis 20% (Abb. 8, gelbe Kurve).

Ein Problem bei der Erklärung der Eiszeiten mit der Einstrahlung in hohen nördlichen Breiten sind die charakteristischen Zeitskalen der Strahlungsschwankungen im Vergleich mit den Zeitskalen für das Wachsen und Verschwinden der grossen Eisschilde. Die Strahlung pendelt zwischen grossen und kleinen Werten in nur 10'000 Jahren, der Aufbau eines Eisschildes benötigt aber mehrere 10'000 Jahre, hingegen kann das Wegschmelzen in weniger als 10'000 Jahren geschehen. Wegen dieser Asymmetrie würde man eher erwarten, dass die Eisschilde nie Zeit genug finden, gross zu werden.

Ein weiteres Problem, das zu vielen Diskussionen, Zweifeln und Spekulationen geführt hat, ist die Tatsache, dass die Sonnenstrahlung im Sommer auf 65 Grad Nord keine deutliche Periodizität von 100'000 Jahren zeigt. Vorgeschlagene Gründe für die 100'000-Jahre-Periode sind die in Bohrkernen aus dem Eis der Antarktis und Grönland gefundenen Variationen des atmosphäri-

Infobox

Sauerstoff besteht zur Hauptsache aus dem Isotop ^{16}O (99.762%) und zu kleinen Teilen aus ^{17}O (0.038%) und ^{18}O (0.2%). Wassermoleküle, die ^{16}O enthalten, verdunsten bevorzugt während Wassermoleküle mit ^{18}O bevorzugt kondensieren. Das hat zur Folge, dass in Zeiten mit kälterem Klima und grösseren Eismassen an Land das Meerwasser leicht an ^{16}O abgereichert ist. Benthische Foraminiferen, einzellige Lebewesen, die am Meeresboden (Benthos) leben, speichern den ^{18}O Gehalt des Ozeanwassers zu ihrer Lebenszeit in ihren Kalkschalen und nach dem Absterben und Absinken auf den Meeresboden in den entsprechenden Schichten des Sedimentes.

Bei Bohrkernanalysen wird der Gehalt des Isotopes ^{18}O in einer Probe meist als Abweichung in Promillen, $\delta^{18}O$, von einem Standardwert angegeben,

$$\delta^{18}O = 1000\left(\frac{(^{18}O/^{16}O)_{Probe}}{(^{18}O/^{16}O)_{Standard}} - 1\right)$$

wobei $^{18}O/^{16}O$ ein Verhältnis zwischen den Gehalten von ^{18}O zu ^{16}O bedeutet. (bla)

Abbildung 7: Ein Eispanzer, so weit das Auge reicht. Wie hier der ostantarktische Eisschild bedeckte das Eis während der grossen Kaltzeiten grossflächige Gebiete Nordamerikas und Eurasiens. Heute sind die Eisschilde so gut wie verschwunden. (Bild: Michael Hambrey)

schen Gehaltes an Kohlendioxid, die ebenfalls eine starke 100'000-jährige Periode aufweisen. Wegen der etwas unsicheren Datierung sowohl der Eiszeitzyklen als auch der Schwankungen des Kohlendioxids konnten Ursache und Wirkung nicht klar auseinandergehalten werden: Waren die Schwankungen des Kohlendioxidgehaltes die Ursache für die Klimaänderungen oder waren die Klimaänderungen die Ursache für die Schwankungen im Kohlendioxidgehalt (siehe dazu Abb. 8)? Es war früh klar, dass die Zyklen der Eiszeiten nicht allein aus den astronomischen Ursachen erklärt werden können, sondern, dass das ganze Klimasystem bestehend aus Atmosphäre, Ozeanen, Landoberflächen und den Eisschilden verstanden werden muss.

Heinz Blatter
Luzernerstrasse 15
CH-4800 Zofingen

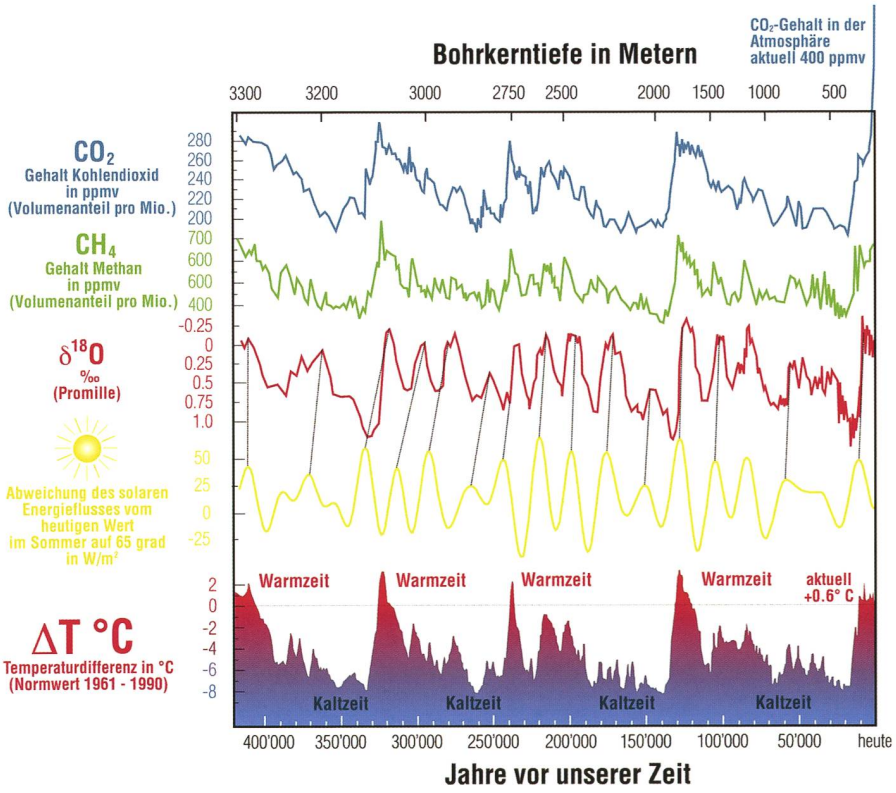


Abbildung 8: Aus Eisbohrkernen bis zu 3,5 Kilometer Tiefe kann die Erdklimageschichte bis 400'000 Jahre vor heute zurückverfolgt werden. Wir sehen die natürlichen Schwankungen des CO_2-, CH_4- und ^{18}O-Gehaltes, sowie den sich ändernden solaren Energiefluss, bedingt durch die Milanković-Zyklen auf dem 65. nördlichen Breitenkreis. Auffällig ist die Korrelation mit den Temperaturabweichungen (ganz unten). Trotz des anthropogenen CO_2-Ausstosses um fast 120 ppm über den «natürlichen Spitzen» liegt die globale Temperaturabweichung aktuell bei +0.6°C. Wie wir sehen, lagen die Temperaturen früherer Warmzeiten über dem heutigen Wert! (Grafik: Thomas Baer)

Quellen

- [1] http://de.wikipedia.org/wiki/Louis_Agassiz#Die_Entwicklung_der_Eiszeittheorie
- [2] Milanković, M., Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem Beograd : Königlich serbische Akademie, 1941

Eisschilde

Gletscher und Eisschilde bestehen aus polykristallinem Eis, das wie eine sehr viskose Flüssigkeit unter dem eigenen Gewicht fliessen kann. Die Massenbilanz, Eiszuwachs im oberen Bereich und Eisschmelze im unteren Teil definieren zusammen mit der Eisbewegung die Form der Eismassen. Bei Klimaänderungen verändert sich sowohl die Massenbilanz, die Geschwindigkeit, die Eisdicke und die Länge des Gletschers. Kontinentgrosse Gletscher werden Eisschilde genannt. Heute gibt es noch die beiden Eisschilde in der Antarktis und in Grönland, deren Massen zusammen etwa 70 m Erhöhung des Meerespiegels entsprächen.

Teil 2

In ORION 6/13 stellen wir die neuesten Erkenntnisse zur Erklärung der Eiszeitzyklen vor. Mit Berechnungen aus einer Kombination mit mathematischen Klima- und Eisschildmodellen konnte das typische Sägezahnmuster des Wachsens der Eisschilde über 100'000 Jahre und das Wegschmelzen in 10'000 Jahren erklärt werden.