

Die Milankovitch Hypothese

Autor(en): **Blatter, Heinz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **47 (1989)**

Heft 235

PDF erstellt am: **31.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-899068>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Milankovitch Hypothese

HEINZ BLATTER

Einführung

Wetter und Klima sind für Astronomen vor allem wegen der Beobachtungsmöglichkeiten wichtig. Es gibt aber auch andere interessante Verbindungen zwischen der Astronomie und der Klimaforschung. So ist die Sonne als Energielieferant der eigentliche Motor für alle Wetter- und Klimaerscheinungen.

Es scheint einleuchtend, dass jede Änderung der Sonneneinstrahlung auf die Erde auch eine grössere oder kleinere Änderung des Klimas auf der Erde haben müsste.

Dass dies nicht immer als so einleuchtend empfunden wurde, zeigt die wechselvolle Geschichte der faszinierenden Idee, dass Klimaänderungen, die auch zu den Eiszeiten führten, mit Änderungen der Erdbahn verbunden sind.

Die Idee einer Verbindung von Klimaänderungen und Erdbahnschwankungen kann bis Laplace zurückverfolgt werden. Das im Jahre 1924 erschienene Buch «Die Klimate der geologischen Vorzeit» von Wolfgang Köppen und Alfred Wegener (Köppen und Wegener, 1924) enthält einen Abschnitt von Milutin Milankovitch, der vielleicht der erste systematische Versuch ist, die Hypothese klimatologisch zu begründen. Er erhielt allerdings zu seinen Lebzeiten keine Anerkennung durch die etablierte Wissenschaft. Erst in den 60-er Jahren gewann die Hypothese, wenn auch in veränderter Form, wieder Anhänger und wird seither weiterentwickelt.

Die hier angesprochenen Klimaschwankungen sind Änderungen mit charakteristischen Zeiträumen von 10'000 bis 100'000 Jahren und sollen nicht mit Schwankungen in viel kürzeren oder viel längeren Zeiträumen vermischt werden. Bei Aussagen über derart komplexe Gebilde wie das Klimasystem sind Angaben über die betrachtete Raum- und Zeitskala wesentlich. Beim Klima- und Wettergeschehen stehen physikalische Prozesse mit Skalenlängen, die sich über viele Grössenordnungen erstrecken, miteinander in Wechselwirkung. Die Beschreibungen der Phänomene müssen aber auf wenige Grössenordnungen beschränkt bleiben, weil sie sonst völlig unübersichtlich werden.

Eine Schwierigkeit, aber auch Faszination der Milankovitch-Hypothese liegt darin, dass Erkenntnisse aus sehr verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen zusammenfliessen müssen:

- Aus der Astronomie und der Mechanik, die die Bahnrechnungen ermöglichen,
- aus der Geologie und Geomorphologie, die die Eiszeiten und damit die Klimaschwankungen entdeckten und nun die Befunde deuten und datieren,
- aus der Klimatologie, die die Entstehung des Klimas untersucht,
- aus der Glaziologie, die die Gletscher und die Entstehung der grossen Vereisungen studiert, und
- aus der Ozeanographie, die einen wichtigen Schlüssel zur Entzifferung der geologischen und glaziologischen Befunde liefern kann.

Eine andere Schwierigkeit der Hypothese liegt in der Komplexität des Systems Atmosphäre - Hydrosphäre - Lithosphäre - Biosphäre mit seinen vielfältigen Rückkopplungen, die mögliche Veränderungen dämpfen oder zusätzlich verstärken können. Die Erfahrungen der Wissenschaften mit derartigen

Systemen zeigen immer deutlicher, dass kleine Ursachen nicht notwendig nur kleine Wirkungen haben müssen.

Die astronomischen Daten zur Milankovitch-Hypothese sind vielleicht die am besten gesicherten Aussagen, da die berechneten Änderungen der Erdbahn nur zur Ursachenseite für die Klimaschwankungen gehören. Die Geschichte der Erdbahnberechnung im modernen Stil beginnt denn auch schon mit der Formulierung des Gravitationsgesetzes durch Newton. Er hat auch erkannt, dass die berechneten Ellipsenbahnen im Planetensystem nur Näherungen sein können, da sich die Planeten gegenseitig auf ihren Bahnen beeinflussen. Eine erste Idee für eine Störungsrechnung geht ebenfalls auf Newton zurück. Durch Laplace und Lagrange stand schon 100 Jahre später ein wirksames Instrument zur Verfügung, das im 19. Jahrhundert durch die Himmelsmechaniker zu erstaunlichen Resultaten führte. Erstaunlich ist vor allem die Virtuosität, mit der die analytischen Methoden verwendet wurden. Ohne Hilfsmittel wie Computer wurden seitenlange Gleichungen umgeformt und ausgewertet.

Bis zu Störungen 2. Ordnung erleidet die grosse Halbachse der Erdbahn keine säkularen Änderungen. Die Entwicklung der drei anderen für die Erdbestahlung wichtigen Elemente, Exzentrizität, Schiefe der Ekliptik und Perihellänge, wird in der Abbildung 1 für die letzten 200'000 und für die nächsten 100'000 Jahre graphisch dargestellt. Die Werte basieren auf Berechnungen von André Berger, Professor an der Université Catholique de Louvain, Belgien (Berger, 1978), der vielleicht einen der grössten Beiträge geleistet hat, um der Milankovitch-Hypothese in neuem Gewand zu neuer Anerkennung zu verhelfen.

Die Entdeckung der Eiszeiten

Es ist wohl kein Zufall, dass im Alpenland Schweiz vielleicht zum ersten Mal die Idee formuliert wurde, dass die Gletscher ehemals eine viel grössere Ausdehnung gehabt haben könnten als heute. Der schweizerische Minister Bernhard Friedrich Kuhn wies im Jahre 1787 auf alte Moränen weit ausserhalb des

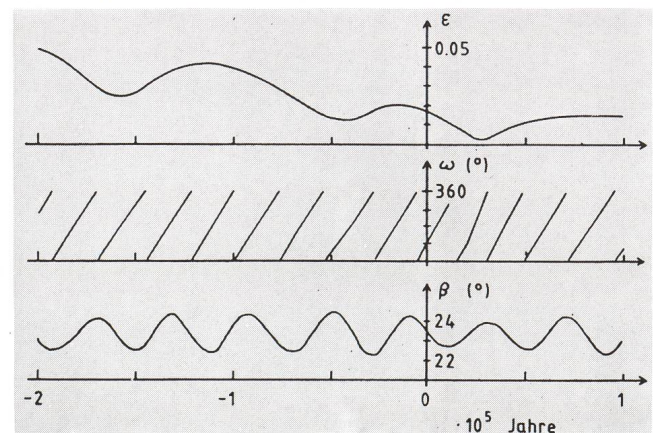


Abb. 1: Variationen der Exzentrizität ϵ , der Länge des Perihels ω relativ zum wandernden Frühlingspunkt und der Schiefe β der Ekliptik für die letzten 200'000 und die nächsten 100'000 Jahre.

heutigen Gletschergebietes hin (Kuhn, 1787). Allerdings muss die schweizerische Priorität für die Entdeckung der Eiszeiten relativiert werden. Kuhn interpretierte wohl die Zeichen der seit dem Ende der Eiszeit vor 18'000 Jahren grössten Ausdehnung der alpinen Gletscher um 1600 richtig, konnte aber keine Hinweise für eine noch grössere Ausdehnung finden. Nur sieben Jahre später kam der Schottische Geologe James Hutton anlässlich seines Besuches im Jura zu den gleichen Schlussfolgerungen (Playfair, 1802). Der Alpinist und Gemsjäger Jean Pierre Perraudin sah die Kratzer auf harten Felsen im Val de Bagnes und erkannte ihre Verwandtschaft mit gleichartigen Zeichen in der Nähe von Gletschern. Er berichtete seine Beobachtungen und Deutungen im Jahre 1815 an Jean de Charpentier, dem Direktor der Salzminen in Bex. Charpentier wollte die Deutungen anfänglich nicht glauben, hingegen stiess Perraudin bei Ignaz Venetz, einem Strassenbauingenieur, auf grosses Interesse.

Es ist aber bemerkenswert, dass auch andere Personen aus der einheimischen Bevölkerung der Berggebiete unabhängig von den Naturforschern die Findlinge und Moränen als Werke von ehemals viel grösseren Gletschern erkannt haben (Imbrie und Palmer-Imbrie, 1979). So berichtet de Charpentier 1934 von einem Holzfäller aus Meiringen, der die Granitfindlinge auf dem Brünig kannte und richtigerweise behauptete, dass der Grimselgletscher die Felsbrocken aus dem Grimselgebiet zum Brünig gebracht habe.

In den Jahren nach 1815 an gab es mehrere unabhängige Beschreibungen von Gletscherschliffen und Moränen, aus dem Jura von Ignaz Venetz (1822), von Jens Esmark in Norwegen um 1824 und von Reinhard Bernhardt in Deutschland um 1832. Der Naturforscher Louis Agassiz, damals Präsident der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, berichtete am 24. Juli 1837 an ihrer Versammlung in Neuenburg über die vielen Beobachtungen in den Alpen und im Jura und übernahm auch den Ausdruck «Eiszeit», den der Münchener Botaniker Karl Schimper im gleichen Jahr zum ersten Mal verwendete (Schimper, 1837). Seine Ausführungen lösten einen Sturm der Entrüstung aus. Sogar Leute wie Alexander Humboldt drängten Agassiz anfänglich, doch wieder zu der sinnvolleren Forschung über Fischfossilien zurückzukehren. Agassiz fand zwar mit seinem Vortrag in Neuenburg keine Anerkennung, aber von da an konnte die Theorie der Eiszeiten trotz dem grossen Widerstand der etablierten Naturforscher nicht mehr ignoriert werden.

In dem klassischen Werk «Die Alpen im Eiszeitalter», erschienen im Jahre 1909, von Albrecht Penck und Eduard Brückner wurden die entscheidenden Fortschritte von lebenslangen Untersuchungen in den Alpen veröffentlicht. Sowohl die Abfolge der Eis- und Zwischeneiszeiten als auch der klimatische Charakter der Eiszeiten wurden beschrieben. Die Namen der einzelnen Vergletscherungen: Günz, Mindel, Riss und Würm, dienen noch heute als Bezeichnungen für die verschiedenen Eiszeiten. Viele detaillierte Untersuchungen über Moränen und Höchststände von Vergletscherungen, Änderungen der Meereshöhe, Formung der Landschaft durch Gletscher und in neuerer Zeit die Analysen und Datierungen von Bohrkernen aus Meeressedimenten und Eiskernen von Grönland und der Antarktis produzierten eine Flut von Daten und Bildern über Klimaschwankungen und Eiszeiten. Die Daten zu deuten und die Entstehung von Eiszeiten zu erklären ist so ein spannendes Forschungsgebiet geworden.

Als Beispiel sei hier sogenannte δO^{18} -Analyse eines Bohrkernes aus Meeressedimenten der Karibik vorgestellt. Das Verhältnis der beiden Sauerstoffisotope O^{18} zu O^{16} in sedi-

mentierten Foraminiferen ist mit der Isotopenzusammensetzung des Wassers, in dem das Plankton lebt, verbunden. Die Isotopenzusammensetzung im Ozeanwasser wiederum widerspiegelt das Volumen des polaren Eises, vor allem in den grossen Inlandeisschildern von Grönland und der Antarktis und während der Eiszeiten zusätzlich in den nordamerikanischen und skandinavischen Eiskappen. Die Zusammenhänge zwischen der Isotopenzusammensetzung und Klimatelementen, zum Beispiel der Lufttemperatur, scheinen aber auch heute noch schlecht quantifizierbar zu sein. Das liegt unter anderem an den zeitlichen Verschiebungen zwischen den Änderungen des Klimas und dem Abschmelzen oder Entstehen der Eismassen einerseits und dem Heben und Senken der Kontinente unter den verschiedenen Eislasten andererseits.

In der Abbildung 2 soll deshalb die originale Analyse des δO^{18}

-Verhältnisses illustriert werden und nicht einer der möglichen Versuche, der Kurve ein klimatologisches Element oder das globale Eisvolumen zuzuordnen. Das Beispiel stammt von C. Emiliani (1966), der mit seinen Bohrkernanalysen in den späten 50-er Jahren die Diskussion um die Milankovitch-Hypothese wieder belebte. Die Datierung des Kernes stammt von W. Broecker und J. van Donk (1970).

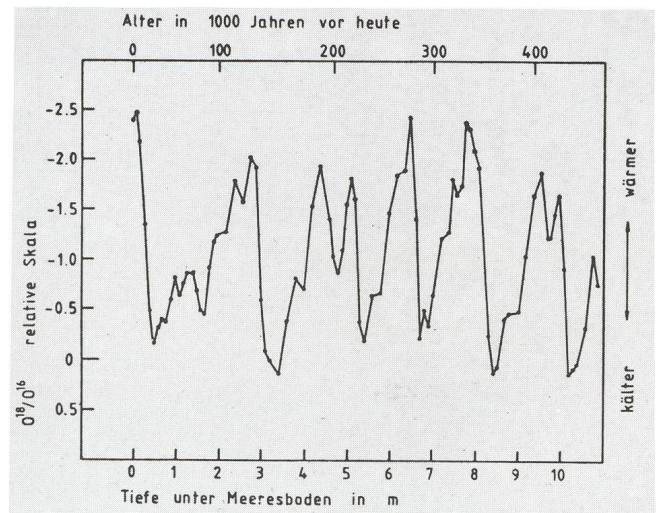


Abb. 2:
Beispiel für eine δO^{18} -Analyse eines Bohrkernes aus Meeressedimenten der Karibik (Nach Emiliani, 1966 und Broecker und van Donk, 1970, verändert).

Der Kanon der Erdbestrahlung

In den letzten 150 Jahren wurden viele brauchbare und auch absurde Vorschläge für die Erklärung der Entstehung und des Verschwindens von Eiszeiten gemacht. Die vorgeschlagenen Theorien können im wesentlichen in zwei Gruppen eingeteilt werden:

— Terrestrische Theorien:

Verschiebung der Pole durch Änderung der Meeresströmungen, Schwankungen des Erdmagnetismus, Schwankungen der Abplattung der Erde, Änderungen des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre z.B. durch Vulkanausbrüche.

— Kosmische Theorien:

Temperaturänderung der Sonne, Kometenabstürze und die in diesem Aufsatz besonders behandelte Milankovitch-Hypothese.

Schon Laplace erwähnte in seinem Werk «*Mécanique Céleste*» die Möglichkeit, dass Erdbahnschwankungen auch zu Klimaänderungen führen könnten. Joseph Adhémar (1942) und James Croll (1867) benutzten derzeitige Berechnungen der langfristigen Änderungen der Exzentrizität und der Ekliptikschiefe und versuchten damit, das Auftreten von Eiszeiten zu erklären. Sowohl die Bahnberechnungen für mehr als 200'000 Jahre wie auch die Kenntnisse in Klimatologie und das Wissen über die Eiszeiten waren damals aber noch ungenau und sehr lückenhaft.

Milutin Milankovitch in Belgrad war der erste, der versuchte, eine systematische Theorie der Zusammenhänge zwischen den Erdbahnschwankungen und den Eiszeiten zu formulieren. Er wurde am 28. Mai 1879 in Dalj, Slavonien (im heutigen Jugoslawien) geboren. Milankovitch studierte an der Technischen Hochschule in Wien wo er am 17. Dezember 1904 zum Doktor der technischen Wissenschaften promoviert wurde. Im Jahre 1909 wurde er Professor an der Universität Belgrad und dozierte dort Mechanik, theoretische Physik und Himmelsmechanik. Ab 1920 publizierte er Arbeiten über die astronomische Theorie der Klimaschwankungen, die in seinem Hauptwerk «*Der Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*» in Jahre 1941 gipfelten. Seine Theorie fand bis zu seinem Tod in Jahre 1958 sehr wenig Anerkennung und sehr viel vehemente Ablehnung. Trotzdem schrieb er etwa zur Zeit seiner Pensionierung unter anderem in einem kurzen Text (Milankovitch, 1984), der wohl als eine Lexikoneintragung über seine Person gedacht sein könnte: «Die Theorie der Eiszeiten, basierend auf Himmelsmechanik, sphärischer Astronomie und theoretischer Physik, hat seither verbreitete Verwendung gefunden».

Der Streit um die Milankovitch-Hypothese wie auch um die Entdeckung der Eiszeiten sind vielleicht gute Beispiele für Paradigmawechsel in einer wissenschaftlichen Disziplin in Sinne von T. S. KUHN (Kuhn, 1969). Es zeigt sich dabei, dass derartige Wechsel und die Akzeptanz einer neuen Theorie oft weniger durch überzeugende sachliche Argumentation als vielmehr durch das Aussterben der konservativen Vertreter der alten Theorie stattfinden. Das Nachrücken einer neuen Generation Wissenschaftler sowie Vertreter aus fremden Disziplinen, die nicht durch eine Ausbildung oder eine Tradition an ein Paradigma gebunden sind, vollenden den Wechsel der Theorien. So besehen ist ein Paradigmawechsel nicht nur eine sachlich wissenschaftliche Angelegenheit, sondern stark auch durch soziologische Aspekte bestimmt.

Heute ist die Idee, dass zwischen den Erdbahnschwankungen und den Klimaveränderungen Zusammenhänge bestehen, kaum mehr bestritten. Diskutiert wird nicht mehr das ob, sondern das wie diese Zusammenhänge aussehen. Damit ist aber vor allem die Klimatologie angesprochen. Die Astronomie hat ihren wichtigsten Beitrag zur Theorie schon geleistet.

Strahlungsklimatologie und Eiszeiten

Die Ausdehnung eines Gletschers oder einer Eiskappe ist in erster Linie durch die Massenbilanz bestehend aus dem Zuwachs durch Schnee in der kalten Jahreszeit und dem Verlust durch Schmelze im Sommer bestimmt. Eine Vergrößerung der Eismasse wird also entweder durch eine Zunahme der festen Niederschläge oder durch Abnahme der Schmelze oder gar durch eine Kombination von beidem bewirkt. Es stellt sich jetzt die Frage nach den astronomischen Bedingungen für die eine oder für beide Ursachen gleichzeitig.

Es ist leicht einzusehen, dass mit einer kleineren Einstrahlung am Ort des Gletschers im Sommer die Schmelze verklei-

net wird. Günstige Verhältnisse für mehr feste Niederschläge im Winter müssen dagegen auf globaler Ebene gesucht werden. Durch die grossräumige Zirkulation der Luft wird Feuchtigkeit von der tropischen Zone in höhere Breitengrade transportiert. Die Dynamik der Zirkulation ist nun durch die Unterschiede in der Einstrahlung zwischen Äquator und Pol bestimmt: je grösser der Unterschied, umso intensiver die Zirkulation. Ist dazu noch die Einstrahlung in den Tropen im Winter und damit die Verdunstung am Boden besonders gross, wird entsprechend mehr Feuchtigkeit in die polaren Gegenden transportiert. Das bedeutet dort aber grössere Niederschläge in Form von Schnee.

In der Abbildung 3 (Blatter und andere, 1984) sind als Beispiele die Strahlungsdefizite und Strahlungsüberschüsse für den Nordsummer (20. Mai bis 20. Juli) als Funktion der Zeit von 200'000 Jahren in der Vergangenheit bis 20'000 Jahre in die Zukunft angegeben. Als Mittelwert ist für jeden Breitengrad das Mittel über die letzten 200'000 Jahre berechnet worden. In der Graphik zeigt sich deutlich die ungefähr 20'000-jährige Periode der Präzession der Erdbahnellipse relativ zum ebenfalls wandernden Frühlingpunkt. In der Abbildung 4 (Ohmura und andere, 1985) werden die Zeiträume, in denen die eine oder die andere oben erwähnte für Vergletscherung günstige Bedingung erfüllt war, angegeben. Für die Nord- oder Südhalbkugel allein ergeben sich so recht lange Intervalle, für die Vereisung begünstigt wird.

Das ist daraus verständlich, dass nur die Schiefe der Ekliptik für beide Halbkugeln symmetrische Bedingungen liefert. Die Effekte der Präzession jedoch liefern vor allem bei grosser Exzentrizität gegenteilige Verhältnisse. Durch die asymmetrische Land-Ozean-Verteilung auf der Erde kann möglicherweise der Nordhalbkugel mit dem Vereisungsschwerpunkt bei etwa 60° Nord die grössere Bedeutung für das Auftreten der Eiszeiten zugemessen werden. Aber auch das kann nicht für jede Vereisung der Vergangenheit als gesichert gelten. Umfassendere Studien mit mathematischen Modellen zur Simulation der globalen Zirkulation wurden und werden gemacht. Dabei wird versucht, die sehr komplexen Zusammenhänge zwischen der globalen Zirkulation, der Land-Ozean-Verteilung, der Meeresströmungen und der Verteilung der Sonneneinstrahlung auf der Erde zu untersuchen. Auch Rückkopplungen, wie die lokale Änderung des Reflektionsvermögens bei der Vergrößerung der eisbedeckten Fläche oder die Veränderung der Meeresströmungen durch Senken und Heben der Meereshöhe und der Kontinente je nach dem Grad der Vereisung müssen dabei berücksichtigt werden.

Die erwähnten Erdbahnschwankungen können sicher nicht als Ursachen der Eiszeiten bestätigt werden. Es kann als sicher gelten, dass die Periodizitäten der Schwankungen der Ekliptikschiefe, der Exzentrizität und der Perihellänge über viele Millionen Jahre ungefähr dieselben geblieben sind. Vor ca 30 Millionen Jahren war aber die Erde bei einem generell wärmeren Klima eisfrei. Es müssen also andere Ursachen gewesen sein, die zu der globalen Abkühlung führten bis das Klimasystem in einen wenig stabilen Zustand geriet, in dem Erdbahnschwankungen quasi als Zünglein an der Waage die Glazial- und Interglazialzeiten auslösten. Das Ausmass der Klimaschwankungen muss allerdings in den inneren Mechanismen und Rückkopplungen des Klimasystems selber gesucht werden.

Das Problem der Entstehung der Eiszeiten ist noch weit entfernt von einer Lösung und bleibt eine faszinierende Aufgabe. Das Besondere daran ist das Zusammenwirken von sehr vielen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, die immer

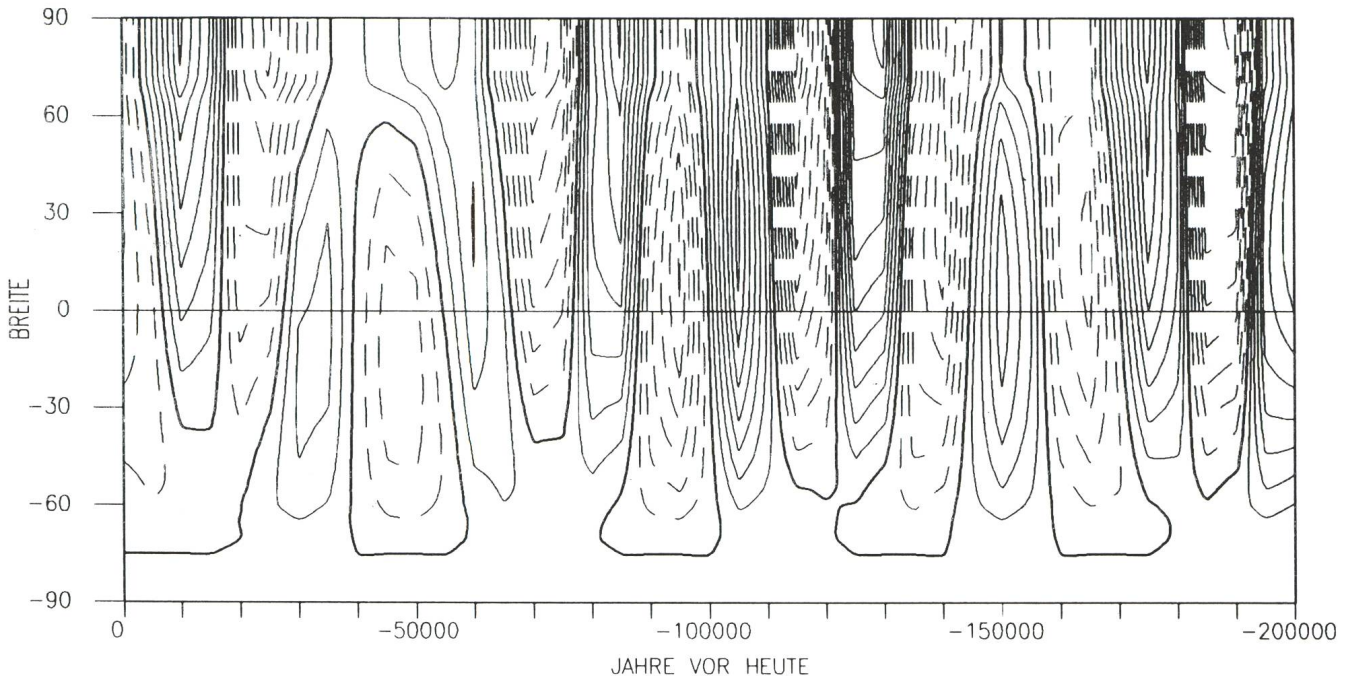


Abb. 3: Abweichungen der Sonneneinstrahlung im Nordsummer als Funktion der geographischen Breite vom Langzeitmittel über die letzten 200 000 Jahre (Aus Blatter und andere, 1984, verändert).

mehr Daten und Indizien sammeln und so ein immer detaillierteres Bild der vergangenen Zeiten mit verschiedenen Klimaten schaffen.

Aber auch die Astronomie wird noch weitere Teile des riesigen Puzzles liefern und an die richtige Stelle legen können. Die oben beschriebenen Klimaschwankungen sind Aenderungen mit charakteristischen Zeiträumen von 10'000 bis 100'000 Jahren. Das Spektrum der Klimaschwankungen reicht aber von Aenderungen im Bereich von einigen 10⁸ Jahren mit der Entstehung unserer Atmosphäre und Biosphäre bis hin zu den Jahr-zu-Jahr Schwankungen. So gibt es geologische Spuren von Vereisungen auf der Erde in der Zeit zwischen 300 und 450 Millionen Jahren vor heute, während zwischen 30 und 300 Millionen Jahren die Erde völlig eisfrei gewesen sein musste. Umgekehrt gibt es Klimaschwankungen mit einer etwa 1000-jährigen Dauer. Das Klima der Zeit von 950 bis ca 1500 n. Chr. war etwa vergleichbar mit dem heutigen Klima, hingegen war die Zeit des 17. bis zu Ende des 19. Jahrhunderts eher kühl, was zum Beispiel auch in der Schweiz zu erheblich grösseren Gletschern führte. Diese Zeit wird als die «Kleine Eiszeit» bezeichnet. Die Jahrzehnte nach 1880 waren durch eine

generelle Erwärmung gekennzeichnet, die auch von einem rapiden Gletscherrückgang begleitet war. Die beiden Beispiele zeigen Klimaschwankungen, die nicht mit der Milankovitch-Hypothese zu erklären sind und deren Ursachen noch im Dunkeln liegen.

Für das Verständnis dieser Klimaveränderungen werden neben geophysikalischen wohl auch noch viele astronomische Daten notwendig sein:

- Die extrem langzeitigen Aenderungen der Erd- und der Mondbahn und damit verbunden, der Tages- und Jahreslänge.
- die Entwicklung der Sonne und die möglichen Schwankungen der Sonnenaktivität mit Perioden verschiedenster Länge.
- Katastrophische Ereignisse wie Kollisionen der Erde mit Asteroiden oder Kometen.
- Mögliche Durchgänge des Sonnensystemes durch staubreiche Regionen der Milchstrasse während des 200 Millionen Jahre dauernden Umlaufes um das Zentrum der Galaxis und den damit verbundenen Aenderungen des Sonnenwindes und der Sonnenatmosphäre.

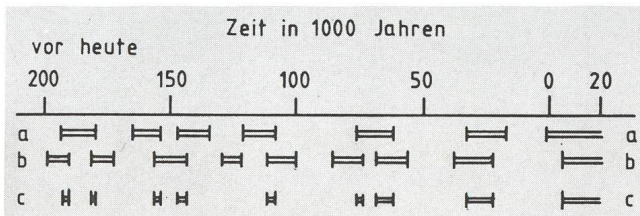


Abb. 4: Für Vergletscherung günstige Perioden: günstig für die Nordhalkugel (a), günstig für die Südhalbkugel (b) uns gleichzeitig günstig für beide Halbkugeln (c)(Aus Ohmura und andere, 1985, verändert).

Literaturhinweise

ADHÉMAR, G.A. 1842. Révolution de la mer, déluges périodiques. Paris, 358 p.

BERGER, A.L. 1978. Long-Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes. Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 35, No. 12, p. 2362-2367.

BLATTER, H., FUNK, M. und OHMURA, A. 1984, Atlas of Solar Climate. Zürich, Geographisches Institut ETH, Zürcher Geographische Schriften, Heft 10, 162 s.

- BROECKER, W. S. and VAN DONK, J. 1970. Insolation Changes, Ice Volumes, and the O^{18} Record in Deep-Sea Cores. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 8, No. 1, p. 169-198.
- CROLL, G. 1867. On the eccentricity of the earth's orbit, and its physical relations to the glacial epoch. *Philosophical Magazine*, Vol. 33, p. 119-131.
- EMILIANI, C. 1966. Paleotemperature analysis of Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425'000 years. *Journal of Geology*, Vol. 74, p. 109.
- IMBRIE, J. and PALMER-IMBRIE, K. 1979. ICE AGES, Solving the Mystery. London, The Macmillan Press, Ltd. 224 p.
- KÖPPEN, W. und WEGENER, A. 1924. Die Klimate der geologischen Vorzeit. Berlin, Verlag der Gebrüder Bornträger, 255 s.
- KUHN, B. F. 1787. Versuch über den Mechanismus der Gletscher. *Magazin für die Naturkunde Helvetiens*, Erster Band, Zürich, bey Orell, Gessner, Füssli und Comp. s. 119-136.
- KUHN, T. S. 1969. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt am Main, suhrkamp taschenbuch wissenschaft, 239 s.
- MILANKOVITCH, M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. Belgrad, Königliche Serbische Akademie, 633 s.
- MILANKOVITCH, V. 1984. The Memory of my Father. Milankovitch and Climate, Understanding the Response to Astronomical Forcing. NATO Advanced Science Institutes Series, D. Reidel Publishing Company, Series C: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 126, Part 1, p. XXIIIV-XXXIV.
- OHMURA, A., BLATTER, H. and FUNK, M. 1985. Latitudinal Variation of Seasonal Solar Radiation for the Period 200'000 Years B.P. to 20'000 A.P. IRS '84: Current Problems in Atmospheric Radiation, Proceedings of the International Radiation Symposium, Perugia, Italy, 21.-28. August 1984, p. 338-341.
- PENCK, A. und BRÜCKNER, E. 1909. Die Alpen im Eiszeitalter, 3 Bände. Leipzig, Chr. Herm. Tauchnitz.
- PLAYFAIR, J. 1802. Illustrations of the Huttonian theory of the earth. Edinburgh, W. Creech, 528 p.
- SCHIMPER, K. 1837. Ueber die Eiszeit. *Memoires de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, Actes 22, s. 38-51.

Dr. HEINZ BLATTER, Luzernerstr. 13, CH-4800 Zofingen

FRAGEN/IDEEN/KONTAKTE

Julianisches Datum und Schaltsekunden

Frage: «Es gibt Regeln zum Berechnen des exakten Julianischen Datums für vergangene und zukünftige Zeiten. Als Grundlage dazu braucht man jeweils Jahr, Datum und Uhrzeit für eine bestimmte Zeitzone. Die verwendeten Umrechnungsformeln nehmen dabei keine Rücksicht auf allfällige Schaltsekunden, die doch recht häufig in den regelmässigen Ablauf unserer Zonenzeit eingeschoben werden. Meine Frage: Ergeben sich da mit der Zeit nicht immer grössere Fehler im berechneten Julianischen Datum?»

Antwort: Das Julianische Datum ist definiert als die Anzahl der Tage, die seit dem ersten Januar des Jahres 4713 v. Chr. 12 Uhr Weltzeit (UT) vergangen sind. Für eine Berechnung des Julianischen Datums für einen gegebenen Zeitpunkt ist die Angabe des Jahres, Monat, Tag und die Weltzeit notwendig. Die Weltzeit ist im Gegensatz zur Internationalen Atomzeit (TAI) und der Ephemeridenzeit (ET) kein gleichförmiges Zeitmass, sondern misst den Lauf der Sonne als Ursache von

Tag und Nacht. Da sich die Drehung der Erde um ihre Polachse infolge der Gezeitenreibung und anderer Mechanismen teilweise graduell und teilweise periodisch ändert, muss die Weltzeit immer wieder neu bestimmt werden.

Für die Berechnung des Julianischen Datums ergibt sich wegen allfälligen Schaltsekunden kein Fehler. Es ergeben sich aber immer grössere Differenzen zwischen der Weltzeit und der Atomzeit, und damit zwischen dem Julianischen Datum und der Atomzeit.

Literaturangaben:

MONTENBRUCK, O. 1984. Grundlagen der Ephemeridenrechnung. Verlag Sterne und Weltraum, Dr. Vehrenberg GmbH, München.

CARTER, W.E. and others. 1984. Variations in the Rotation of the Earth, by W.E. CARTER, D.S. ROBERTSON, J.E. PETTY, B.D. TAPLEY, B.E. SCHUTZ, R.J. EANES and MIAO LUFENG. *Science*, Vol. 224, No. 4652, p. 957-961. (Auszug auf Deutsch in der NZZ, 18. Juli 1984)