

Eugen Seibold · Ilse Seibold

Milankovitch's Strahlenkurve und deren geologische Deutung - Anfänge in Deutschland

Erhalten: 13. Januar 2005 / Akzeptiert: 14. Februar 2005 / Online publiziert: 13. Mai 2005
© Springer-Verlag 2005

Die langfristigen Schwankungen der Sonneneinstrahlung, die durch periodische Veränderungen der Erdbahnelemente bedingt sind, hat Milutin Milankovitch (1879–1958) berechnet und in „Strahlungskurven“ für verschiedene Breitengrade und für die letzte Million Jahre zusammengefasst. (Vor allem 1920, 1930, 1938, 1941). Sie sind inzwischen zur Basis einer absoluten Datierung der wesentlichen Klimaschwankungen im Pleistozän geworden. Darüber hinaus wird zunehmend versucht, diese „astronomische Theorie“ für rhythmische Sedimente auch in früheren Abschnitten der Erdgeschichte heranzuziehen.

Die geologische Anwendung der Milankovitch-Kurven wurde indessen bis zu seinem Tode ganz überwiegend abgelehnt. Unbeirrbarer Anhänger fand er vor allem in Deutschland, wo es auch Vorläufer für seine Berechnungen gab.

Vorläufer

Kurz das Allgemeine: Bekanntlich stellte schon Kepler 1609 fest, dass die Erdbahn eine Ellipse darstellt und die Sonne in einem ihrer Brennpunkte liegt. Newton wies dann 1686 auf den Einfluss der Planeten und damit auf Abweichungen bei dieser Bewegung hin, die in der Folge zu berechnen versucht wurden. Beispiele sind J. Lagrange (1782), P.S. Laplace (Hauptwerk 1799–1825), U.J.J. Le Verrier (1843) oder J.N. Stockwell (1879). Der Schritt von den astronomischen Berechnungen zur klimatologischen Deutung geht auf Herschel (1830) zurück. Er behandelte den Einfluss der Exzentrizität, die sich in Perioden von 100000 Jahren ändert. (Wächst sie, so werden die Unterschiede der Einstrahlungsintensität zwischen den Hemisphären größer). Der französische Mathematiker Adhémar (1842) betonte dabei den Ein-

fluss der Präzession. (Die Erdachse beschreibt mit einer Periode von 23 000 Jahren eine kegelförmige Kreiselbewegung, was die Länge der Jahreszeiten beeinflusst). Der Schotte Croll (1864, 1875) schloss den Einfluss des dritten Faktors, der Schiefe der Ekliptik mit einer Periodizität von 40000 Jahren mit ein. (Sie ist die Ursache der Jahreszeiten und für hohe Breiten besonders wichtig). Da aber teilweise nur totale Effekte und nicht die Auswirkung auf die unterschiedlichen Breitengrade (Ball 1892) oder nicht immer alle diese drei Faktoren einbezogen wurden, konnten die Schlüsse nicht überzeugen.

Deutsche Beiträge

Der Geologe Max Hildebrand (1901) berücksichtigte sie alle, stellte jedoch den Einfluss der Exzentrizität ganz in den Vordergrund. Er kam zu zeitlich falschen Vorstellungen und diskutierte die Ursachen der Eiszeiten, auch unter Hinzuziehen des Golsstroms, mitunter recht abenteuerlich. Die ausführlichsten Ableitungen unter Heranziehung der Formeln von J.N. Stockwell gehen auf Ludwig Pilgrim (Frankfurt/Main 1849 - Stuttgart 1927) zurück. Er hatte 1876 in Tübingen promoviert, war dann als Mathematiker Assistent an der Technischen Hochschule in Stuttgart und von 1898–1913 Gymnasialprofessor in Bad Cannstatt. Von 1912–1924 leitete er die meteorologisch-geophysikalische Abteilung des Württembergischen Statistischen Landesamtes. Aus dieser Arbeit erwachsen auch seismische Veröffentlichungen. 1904 versuchte er, mit seinen Berechnungen bis auf eine Million Jahre zurückzugehen und die von Albrecht Penck (Leipzig 1858 - Prag 1945) aufgestellten vier „Eiszeiten“ zeitlich einzuordnen. Er nahm aber an, dass strenge Winter und heiße Sommer die Vorbedingung für eine Kaltzeit sind und kam dadurch zu einer völlig falschen Einordnung. Die Würm-Eiszeit ließ er vor 220 000 bis - 30 000 Jahre (vor 1850) dauern, die Riss-Eiszeit von - 580 000 bis - 350 000 und die Mindel-Eiszeit von - 940 000 bis - 770 000. Die letzte Zwischeneiszeit, (Eem),

kam damit auf 130 000 Jahre, die vorletzte, (Holstein), auf 170 000 Jahre.

Prinzipielle Einwände kamen beispielsweise von Gustav Steinmann (1910: 72): „Wenn nun gar, wie das tatsächlich zutrifft, die wesentliche Gleichförmigkeit der Ereignisse nicht nur für die verschiedenen Gebiete der Nordhalbkugel, sondern auch für die südliche nachgewiesen werden kann, so ist damit das klimatische Problem der Diluvialzeit als ein ganz allgemeines erkannt, und dadurch werden alle Theorien ausgeschaltet, die die Vereisungen auf eine abwechselnde ungünstige Beeinflussung der beiden Halbkugeln durch astronomische Vorgänge wie wechselnde Exzentrizität der Erdbahn usw. zurückführen. Wenn wir auch über die wahre Ursache der Eiszeiten keine bestimmte Erklärung abgeben können, so dürfen wir doch behaupten, dass sie nur durch einen Wechsel der Wärmezufuhr verursacht sein können, der in gleichmäßiger Weise die gesamte Erde betroffen hat.“

Milankovitch nahm sich dieser Probleme mit großem mathematischen Aufwand an, - und dies damals ohne Computer. Er wurde 1879 im serbischen Dorf Dalj an der Mündung der Drau in die Donau, unweit der Kreisstadt Osijek (Esseg) und 50 Kilometer südlich der ungarischen Grenze geboren. 1904 promovierte er an der Technischen Hochschule in Wien im Bauingenieurwesen und kam, auch durch Patente auf dem Gebiet der Betonkonstruktionen, rasch zu Ansehen und auch zu guten Einkünften. Trotzdem übernahm er 1909 den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik an der Universität in Belgrad, teilweise durch Kriegsgefangenschaft in Budapest unterbrochen. Im Belgrad beschäftigte er sich ab 1910 auch mit der Einstrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche, er griff schließlich auf die Formeln von Stockwell und die Berechnungen von Pilgrim zurück und publizierte danach 1920 seine „Strahlungskurven“. Dabei ging er auch auf die Einstrahlung auf andere Planeten und den Mond ein.

Der langjährig an der Deutschen Seewarte in Hamburg als Meteorologe tätige Wladimir Köppen (St. Petersburg 1846 - Graz 1940) hatte mit ihm durch einen Brief vom 20.9.1922 Kontakt aufgenommen (Milankovitch 1995: 62) und ihn dann persönlich um die Kurve für 55°, 60° und 65°N bis 650000 Jahre gebeten. Er verknüpfte diese (1924) mit den damals allgemein anerkannten vier Eiszeiten Albrecht Pencks und forderte hierfür k ü h l e Sommer, die das Abschmelzen des Eises vermindern und m i l d e Winter, die den Schneefall fördern.

Damit begannen Kontakte Köppens mit Wolfgang Soergel (Weimar 1887 - Freiburg 1946). Dieser besaß eine breite Wissensbasis für die Erforschung der Eiszeiten. 1910 wurde er bei Wilhelm Deecke in Freiburg mit einer Arbeit über zwei Elefantenarten und ihrer Bedeutung für die Gliederung des deutschen Diluviums promoviert. Schon damit stellte er die Weichen für sein späteres Lebenswerk. Die Habilitation in Tübingen 1916 lautete folgerichtig: „Über Löss, Eiszeiten und paläolithische Kulturen“. Bei aller Vielseitigkeit Soergels blieb

der Schwerpunkt seiner rund 800 Veröffentlichungen die umfassende Erforschung des Eiszeitalters in Deutschland. Dazu gehören die morphologischen Veränderungen der Landschaft und der sie formenden Prozesse in Kalt- bzw. Warmzeiten, also Aufschotterung (1921) und Lössablagerung bzw. Travertinbildung und Bodenverwitterung. Genau so gründlich wurden die Veränderungen der Pflanzen- und vor allem der Tierwelt mit dem Vorkommen von Mammut bzw. Waldelefant oder Riesenhirsch im Gelände und in zahllosen Museumsbeständen untersucht. Bis zuletzt beleuchtete er auch die Entwicklung des Menschen seit dem Auftreten des Homo heidelbergensis.

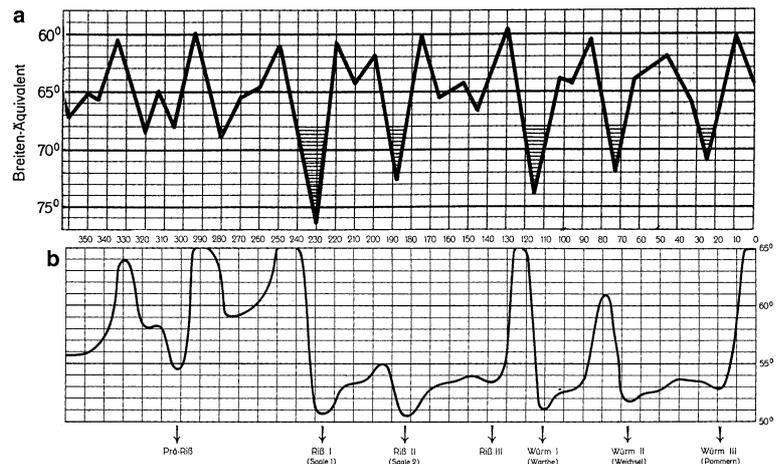
In unserem Zusammenhang sind zunächst seine gründlichen Geländeuntersuchungen im Periglazialgebiet Mitteldeutschlands hervorzuheben. „Soergel hat der periglazialen Geologie Europas feste klimatische, bodenkundliche, biologische und geomorphologische Grundlagen gegeben.“ (Carl Troll 1944: 313) Er konnte unter anderem nachweisen, dass der Löss in Kaltzeiten verfrachtet wird (1919). „Er verhält dem glazialen Alter des Löss zum Sieg.“ (Troll 1944: 312). Seine aus diesen Studien abgeleitete Dreigliederung der Würm-Eiszeit stimmte mit Köppen (1924, 161) überein und wurde in die Milankovitch-Kurve für 55°N eingepasst. 1921 war er „auf die Ursachen der diluvialen Aufschotterung und Erosion“ eingegangen und belegte seine Folgerungen durch die Untersuchung der Abfolge der Ilmterrassen in Thüringen (1924). Alle seine Beobachtungen fügte er 1925 in Köppens absoluten Zeitrahmen ein und kam dabei zu 11 diluvialen Kaltzeiten, also zu wesentlich mehr Eisvorstößen als A. Penck.

Von anderer Seite wurde diese Einpassung geologischer Befunde in den astronomischen Rahmen danach für alle großen deutschen Flußsysteme versucht, so auch von dem Kreisheimatpfleger Bartholomäus Eberl (1930) (Benediktbeuren 1883 - Gröbenzell 1960) für das Iller-Lechgebiet, wo zudem eine dreigeteilte ältere „Donau“-Eiszeit nachgewiesen werden konnte. Deshalb regte er Milankovitch an, seine Berechnungen von 600000 auf 1 Million Jahre auszuweiten. Eberl lobte Soergel für seine Bemühungen in der „Terrassenstratigraphie“: „So mancher norddeutsche Geologe scheint sich ja gänzlich vor dieser Arbeit zu fürchten“ (Brief an Soergel vom 14.10.1928, GA 56/1691). Abb. 1 stellt eine Kombination der Milankovitch-Kurve mit den nach unten zeigenden Spitzen der Kaltphasen und darunter in einer „Vereisungskurve“ die Vorstöße der skandinavischen Eismassen nach Thüringen hinein dar. Erfurt und Weimar auf 51°N wurden beispielsweise in der Saale- (in Süddeutschland = Riss-) Eiszeit zweimal vom Eis überfahren.

Neueste einschlägige Untersuchungen in Thüringen haben dieses Bild verfeinert und auch stellenweise verändert (Unger and Kahlke 1995).

Milankovitch selbst würdigte diese Ansätze und machte das Kompliment: „Die Vollgliederung ist ... die grundlegendste und wichtigste ... Arbeit, die über diesen Gegenstand bisher geschrieben worden ist.“ und dann

Abb. 1 Strahlungskurve und Eisvorstöße **a** Milankovitch berechnete (1920 ff) für das Sommerhalbjahr und 65°N die Sonneneinstrahlung. Die Kurven geben an, um wieviel ein Ort dieser Breiten dadurch nach Süden oder Norden verschoben erscheint. (Nach Köppen 1924, Tafel) **b** Soergel (1938) zeigt in seiner „Vereisungskurve“, wie weit das skandinavische Eis jeweils nach Thüringen/Sachsen vorgestoßen ist. Weimar liegt auf 51°N



auch noch: „... Denn die Fragen, mit denen wir uns jetzt beide befassen, haben - wir können dies unter uns frei ansprechen - weitgehende geschichtliche Bedeutung.“ (Brief an Soergel vom 4.4.1936, GA)

Soergel setzte alle einschlägigen Untersuchungen fort. Er hatte den Plan, alle seine Befunde aus der Geologie, Morphologie, Paläoklimatologie und aus der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Pflanzen- und Tierwelt in einem „Diluvialen System“ - (ab 1939) - zusammenzufassen. Sein früher Tod verhinderte dies. 1938 gab er seinen letzten allgemeinverständlichen Überblick des Eiszeitalters heraus. Doch schon vorher, am 19. Dezember 1937, hatte ihm Milankovitch persönlich seine Pionierarbeit bestätigt:

„... Durch Ihre Vereisungskurve << von 1937 >> haben Sie, wie Sie es treffend bezeichnen, den geologischen Ausdruck der Strahlungskurve geformt und das Gebäude, an dem wir jahrzehntelang arbeiteten, mit einem mächtigen Aufbau versehen und und zu einer festen Burg gestaltet.

Die Hochburg der Vollgliederung! Ihre grundlegenden Arbeiten, jene von Wundt und die Arbeiten Ihrer Schüler haben Freiburg zur Residenz- und Hauptstadt der Quartärforschung erhoben...“ (19.12.1937. GA)

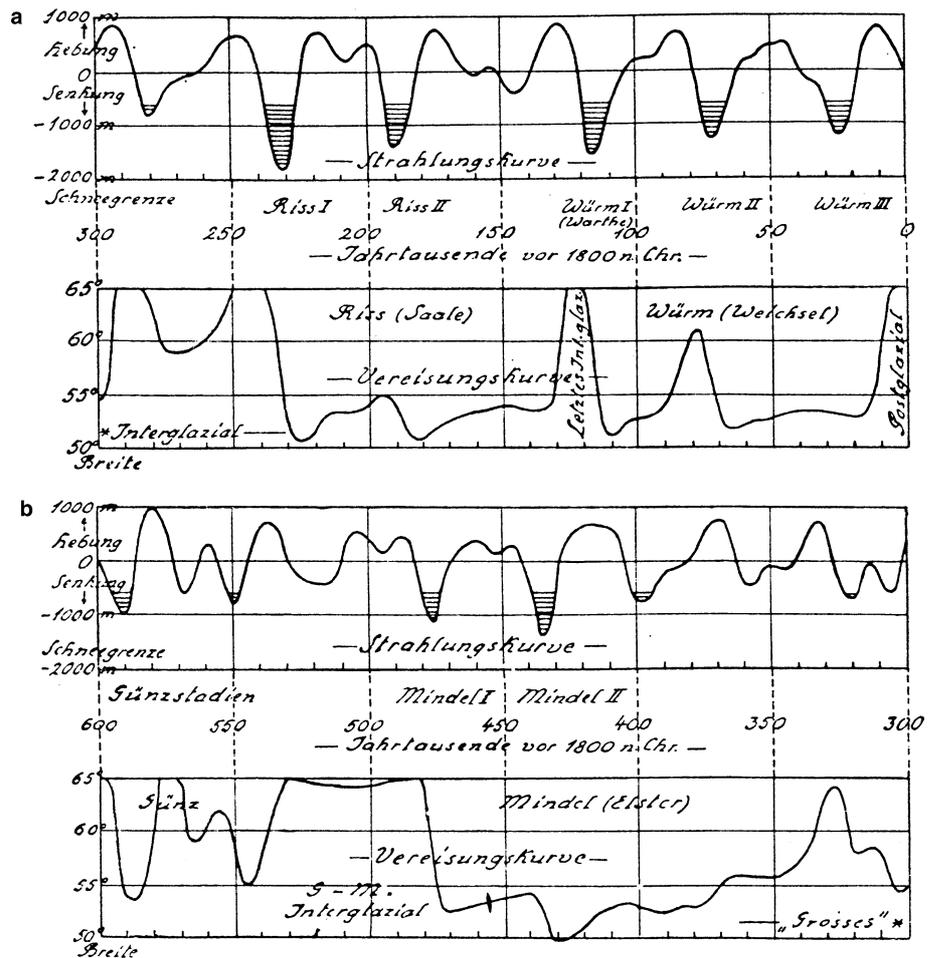
Zur Freiburger Gruppe: Der wichtigste Schüler Soergels war Friedrich Eberhard Zeuner (Berlin 1905 - London 1963). Er war von 1925 bis 1930 Assistent in Breslau und wurde bei Soergel, der von 1926 bis 1931 das dortige Ordinariat innehatte, 1927 promoviert und 1930 habilitiert. Zeuner verfasste einige stratigraphische, paläobotanische und paläozoologische Arbeiten in unserem Rahmen. 1931 folgte er Soergel als Assistent nach Freiburg, eine Stelle, die er bald wegen seiner jüdischen Frau verlor. Ab 1934 war er bis zu seinem Tod in verschiedenen Positionen in London tätig. Er publizierte bis zum 2. Weltkrieg in der Folge viele einschlägige Arbeiten, die bald über den deutschen Bereich hinausgingen (1935, 1938, 1939). Die ausführlichste Zusammenfassung erschien bezeichnenderweise durch die Vermittlung von Milankovitch in deutscher und serbischer Sprache in der Akademie in Belgrad (1938). Danach erschienen seine Standardwerke wie „Dating the

Past“ (1946, 1950, 1955, 1958, auch spanisch, russisch und japanisch) oder „The Pleistocene Period“ (1945, 1955, 1959). Zeuner hatte es fachlich nicht leicht gehabt, in England Fuß zu fassen. Seine Ansichten zur Strahlungskurve wurden dort vor allem durch den Meteorologen G.C.Simpson (1940) zurückgewiesen. Vorlesungen sollten (Brief an Soergel, 25.9.1935, GA) „die Grundlage sein für die Ausdehnung der Vollgliederung auch auf andere englische Länder.“ In England herrsche „eine erschreckende Unkenntnis der deutschen Literatur, auch ein gewisses Misstrauen..., deshalb muss man etwas psychologisch vorgehen und sie langsam mit dem Bazillus der Vollgliederung infizieren“. Er blieb der Universität Freiburg stets verbunden, schrieb er doch am 10.7.1956 (GA 12601) in der - vergeblichen! - Bemühung, wenigstens als Emeritus geführt werden zu können, an das Rektorat „als Schüler von Professor W.Soergel seit 1925 in Tübingen und Breslau“; „Als sein erster Schüler bin ich dann auch als Geologe bekannt geworden infolge meiner Eiszeitforschungen, die mit-helfen, die Freiburger Schule zu begründen... Im Laufe der letzten 20 Jahre habe ich als ein Jünger der Freiburger Schule internationalen Ruf erworben...“ Mit dieser Feststellung hatte er durchaus recht, denn er wird zum Beispiel von O.H.Schindewolf am 8.11.1951 folgendermaßen beurteilt (Schreiben an den Dekan in Bonn, GA 16559): Zeuner... „darf wohl bedenkenlos als der ideen- und auch erfolgreichste der gegenwärtig lebenden Geologen-Paläontologen Deutschlands bezw. deutscher Abkunft gelten. Er kommt aus der ausgezeichneten Schule von W.Soergel...“

Alle Versuche, ihn nach dem Krieg nach Deutschland zurückzuholen, waren indessen vergebens, da er inzwischen in England feste Wurzeln geschlagen hatte.

Ein weiterer engagierter Mitspieler Soergels war Walter Wundt (Schorndorf 1883_-Genf 1967). Er hatte in Berlin 1914 als Meteorologe promoviert und ging dann als Mathematiker in den Schuldienst, den er aus gesundheitlichen und politischen Gründen 1934 quittieren musste. Soergel verschaffte ihm vom selben Jahr an Lehraufträge an der Freiburger Universität. Mit Unterbrechungen nahm er sie bis zu seinem 75. Lebensjahr

Abb. 2 Verbesserte Strahlungskurve mit Höhe der Schneegrenze und „Vereisungskurve“
a Strahlungskurve einschließlich Reflexionseffekt nach Milankovitch für das Sommerhalbjahr auf der Nordkalotte bis 55°N. Auswirkung auf die Hebung und Senkung der Schneegrenze in Metern. **b** „Vereisungskurve“ nach Soergel (1938) Hier bis - 600 000 Jahre. Aus Wundt (1944, S. 725)



wahr, mit Themen aus der Hydrologie, Paläoklimatologie und über „exakte Grundlagen der Geographie“. 1947 wurde er zum Honorarprofessor ernannt. Vorher schon, 1942, war er in die „Leopoldina“ in Halle aufgenommen worden. Aus engen Kontakten mit Milankovitch seit 1937 erwachsen einige Verbesserungen der Strahlungskurven. So konnte vor allem die Wirkung des Albedo eingearbeitet werden. (1938 und 1944). Abb. 2 fasst diese Freiburger Bemühungen zusammen. Eine Würdigung Wundts, eines äußerst kenntnisreichen, aber eher stillen Gelehrten, stammt aus der Feder von Pfannenstiel (1968).

Einwände

Wie erwähnt, war die Fachwelt von Anfang an skeptisch. Zunächst wurden vielfach für die Klimaschwankungen ganz andere Ursachen herangezogen. Die Solarkonstante sollte sich geändert haben. Dunkelwolken oder Vulkanausbrüche hätten immer wieder die Sonne verfinstert. Diese hätten sich dann auch auf die gesamte Erde synchron ausgewirkt, während ja mit der astronomischen Theorie Unterschiede zwischen Nord- und Südhemisphäre auftreten müssten. Diese Einwände

wurden von den Freiburgern zurückgewiesen, weil sie zum Teil nicht beweisbar seien oder weil eben die Nordhalbkugel der eigentliche Schrittmacher für Veränderungen sei. Der Nordpol läge im von Landmassen umgebenen Arktischen Ozean, einem durch das Auftreten und Verschwinden von Meereis insgesamt viel empfindlicheren System als das antarktische. Auf dem dortigen Festland könne ein großes Reservoir an Inlandeis Schwankungen eher abpuffern.

Die Auswirkung der Polwanderung wurde von Gegnern herangezogen. Ihr Effekt für das Pleistozän wurde aber als unwesentlich zurückgewiesen.

Hartnäckig wurde in Zweifel gezogen, ob die errechneten so kleinen Temperaturschwankungen für große Vereisungen überhaupt ausreichend seien. Schließlich wurde gefragt, warum es bei den ja konstanten Erdbahnparametern nicht auch im Tertiär und davor zu Eiszeiten gekommen sei.

Soergel (1937, 1938) wies darauf hin, dass zu den Auswirkungen der Strahlungskurve auch noch andere Faktoren herangezogen werden müssten, etwa die gesamte Konfiguration der Verteilung von Festland und Ozeanen. eine „Erdbereitschaft“ müsse dazukommen, die beispielsweise in der Kreidezeit eben nicht vorhanden gewesen sei.

Zeuner ging ausführlich auf 14 derartiger Einwände ein (1950, 395/395). Zunächst warnte er selbst davor (Punkt 12, 395), in der Erdgeschichte zu weit zurückzugehen, da Milankovitch einen Fehler bis zu 10% für eine Million Jahre annahm und er wies auch auf andere offene Fragen hin.

Eine Reihe von Jahren ging es um Differenzen, die die Strahlungskurve selbst betrafen. Dabei spielte Rudolf Spitaler (Bleiberg 1859 - Lübthen 1946), ab 1909 Professor der Kosmischen Physik an der Deutschen Universität in Prag, eine große Rolle. Er hob von Anfang an die Rolle von kühlen Sommern und milden Wintern als Ursache für Eiszeiten heraus. Zunächst hatte er die Schiefe der Ekliptik bei seinen Überlegungen ausgeklammert (1921) und kam auch später zu Kurven, die von denen Milankovitch's abwichen. Die Dauer der Eiszeit sollte nach ihm doppelt so lang wie die angenommenen 600 000 Jahre sein. Milankovitch konnte aber Berechnungsfehler nachweisen, sodass Spitaler (1943) weitgehende Korrekturen anbrachte und eine Angleichung erreicht wurde. Wie aufgeregt alles diskutiert wurde, möge aus einigen Briefen von Zeuner an Soergel hervorgehen.

Zeuner fragte am 18.4.1938 besorgt, ob ein Gerücht aus Paris stimme, dass er, Soergel und Milankovitch dabei seien, die Strahlungskurve auf diese doppelte Zeitdauer zu dehnen und sich dadurch Spitaler anzunähern (GA). Am 25.5.1938 beruhigte er sich aber und dankte für einen aufklärenden Brief (GA): „... Der Klatsch betreffend Änderung der Strahlungskurve ist tatsächlich eine ärgerliche Sache. Ich hätte den Quatsch natürlich nicht beachtet, wenn er nicht von einem Kollegen verbreitet worden wäre, dem ich so etwas nicht zugetraut hätte, und trotz wiederholter Bitten hat mir Milankovitch nie richtig erklärt, was an Spitalers Rechnung falsch ist. Nun war Mi. vor kurzem in Prag, und da war es schließlich nicht unmöglich, dass sie beide zu einer Einigung gekommen sind. Es hätte an dem geologischen Unterbau nichts geändert, hätte aber den bornierten Antistrahlerkurvlern einen Triumph verschafft. Inzwischen habe ich auch von Milankovitch gehört, dass die Tabellen richtig sind, wie 1930 publiziert, und dass infolgedessen die Kurven bleiben, wie sie sind...“

Ein besonders hartnäckiger, zudem äußerst einflussreicher Gegner war Albrecht Penck. Er hatte direkte Kontakte mit Soergel. Schon am 1.1.1917 hatte er ihm zu dessen Publikation über „altquartären Säuger Badens“ gratuliert (GA). Danach korrespondierte er mit ihm über die Höttinger Breccie.(2.2.1920,GA). Nach langer Pause wurde erst am 15.3.1928 (GA) der Faden wieder aufgenommen. Penck berichtete von einem Besuch bei „Benefiziat Eberl“ aus dem Jahre 1925 (!!). Dieser sei „ein sehr fleißiger Beobachter“, der Neues beigebracht hätte. Penck sei aber nicht überzeugt davon, „dass jede Eiszeit sozusagen zwei Kulminationen hat“, doch gebe es durchaus positive Argumente. Woldstedt bringe dieselben aus Norddeutschland. Dann aber: „Ich benütze die Gelegenheit, Ihnen wenn auch sehr verspätet sehr herzlich für Ihre Gliederung und absolute Zeit-

rechnung des Eiszeitalters zu danken, die Sie mir schon vor zwei Jahren (!) zusandten.“ Ein Amerika-Aufenthalt und Lehrverpflichtungen wären der Grund für die Verspätung. Das klingt doch recht distanziert! Seine Einwände fasste er dann auch 1938 und 1939 zusammen, wobei er vor allem seine Erfahrungen in den Alpen, auf 45°N heranzog.

Ausführlich geht er (1938) auf die bisher so unterschiedlichen Bemühungen ein, klimatische Auswirkungen aus den Klimakurven abzuleiten. Pilgrim (1904) erwähnt er dabei nicht. Die Ansicht, dass k ü h l e Sommer eine Vorbedingung für Eiszeiten sind, verwirft er. Die Existenz der „Donau“-Vereisung Eberls hält er für falsch, da es sich dabei um „Günz“-Schotter handle (S.337). Kritisch geht er natürlich auf die Unterschiede der Gliederungsversuche Spitalers und Milankovitchs ein (Tabelle S. 340).

	Spitaler	Milankovitch
Günz-Eiszeit	1 334-1 170	Jahrtausende 600-545
–	–	–
Würm-Eiszeit	230-50	122-18
Summe Eiszeiten	694	370

Soergels Ableitungen aus der Gliederung der Ilmterrassen geht er frontal an (S. 343 ff). Er bezweifelt sogar, ob Schotterterrassen unbedingt glazialen Klima zugerechnet werden können. Es gäbe auch interglaziale Aufschotterungsterrassen und die Tektonik spiele zudem eine Rolle. (S.343-344). Fazit: Insgesamt seien die Klimaschwankungen des Eiszeitalters... „nicht in der Verteilung der Strahlen auf der Erdoberfläche, sondern im Wechsel der Strahlung selbst begründet“ (1939, 79). Diesem Verdikt war zudem ein Eklat auf der Wiener Tagung der INQUA (International Quarternary Association) im September 1936 vorausgegangen. In seinen Lebenserinnerungen schildert Milankovitch ausführlich die dramatische Situation (Milankovitch 1995: 131) Die Tagung war zu Ehren von Penck, einem der Gründer und dem Ehrenpräsidenten von INQUA zu dessen 78. Geburtstag einberufen worden. Er eröffnete sie mit einem Grundsatzreferat. Darin wies er mit einer alle beeindruckenden Eloquenz u.a. die Ansicht zurück, dass k a l t e Sommer den Anstoß für Glaziale gäben. Der als Beobachter anwesende Milankovitch wagte Einwände vorzubringen. Ärgerlich erwiderte Penck, dass die astronomischen Theorien uns keine Antworten für Erklärung der Eiszeiten gäben. Das gehe allein daraus hervor, dass die Ergebnisse von Milankovitch und Spitaler nicht übereinstimmen (s.o.). Milankovitch rief dazwischen, dass dies nicht s e i n Fehler sei. Darauf lief Penck rot an und lehnte sowohl die Theorie von Milankovitch als auch die Ergebnisse von Soergel und Eberl ab. Eine nochmalige Intervention wurde nicht erlaubt, sodass Milankovitch die Tagung verließ.

Die Freiburger Gruppe wehrte sich entsprechend. Wundt (1944, 717) warf Penck (1938, 321, 324) zusammenfassend vor, den Gang der J a h r e s s u m m e der Strahlung berechnet und deshalb nur minimale Schwankungen erhalten zu haben. Entscheidend sei aber die

veränderte Verteilung auf die J a h r e s z e i t e n. Zudem sei der Reflexionseffekt nicht berücksichtigt worden.

Zeuner schrieb an Soergel (29.6.1938, GA): „... Vielen Dank für ihren Brief. Wenn Milankovitch Spitaler aus Freundschaft nicht berichtigen will, so verstehe ich das. Als ich einmal Mil. persönlich fragte, warum er Sp. nicht mal gründlich engengetrete, gab er allerlei ausweichende Antworten, betonte aber, dass in Sp.'s Rechnungen ein Fehler sei. Jedenfalls freut sich Penck wie ein Strauchdieb über die Differenz zwischen Sp.'s und Mi.'s Tabellen und nützt das aus, um allenthalben zu verbreiten, dass die Strahlungskurve Unsinn ist. Wenn er auch letzten Endes unrecht behalten wird, so zeigt doch die Tagung in Wien, << 1936 >> wie sehr die Mehrzahl unserer hochgeehrten Kollegen an seine Autorität glauben.“...

Eberl an Soergel am 5.7.1940 (GA56/169.15): „...Fein, dass Sie endlich einmal die Frage der Eiszeitabwicklungen in dieser ausführlichen und ausgezeichneten Weise << 1937, 1938 >> geklärt haben. Und die prachtvoll antiseptische Behandlung der Stellungnahme Pencks!!...“ Anlässlich des hundertsten Geburtstags von Penck geht Wundt (1958/59) noch einmal auf dessen Einwände ein. Dass beispielsweise die Alleröd-Warm-Episode mit einer Dauer von nur einigen Jahrtausenden nicht in der Strahlungskurve erscheine, läge daran, dass die Erdbahnelemente mit ihren Auf- und Abstiegen mindestens 10 000 Jahre benötigen, um sich klimatisch auswirken zu können (S.24/25). Insgesamt werden versöhnliche Töne angeschlagen, da man sich aufeinander zubewegt hätte.

Zwei Jahrzehnte zurück! Milankovitch hatte die Summe seiner Erfahrungen und Ergebnisse zusammengestellt. Da sich deutsche Wissenschaftler am meisten dafür interessiert hatten, beschloss er, seinen „Kanon der Erdbestrahlung“ auf deutsch zu publizieren, was ihm die serbische Akademie auch 1939 erlaubte. Das Buch wurde danach gedruckt und in der Akademie gelagert, wo der Bestand aber durch einen deutschen Luftangriff (!!) am 6.4.1941 verschüttet wurde. Das Werk konnte erst im Herbst nach Ersatz von Verlusten ausgeliefert werden.

Milankovitch ließ sich durch all diese Einwände und Schicksalschläge niemals beirren. In einem Brief vom 15.2.1954 an F.E.Zeuner steht: „Was in meinem Werk richtig ist, das wird bleiben und leben durch eigene Kraft.“ (In der Übersetzung der von seinem Sohn Vasko verfassten Biographie von 1995:180: „My work which is correct will remain and live on its own.“

Erst nach dem Tod Soergels im Jahr 1946 setzt sich Martin Schwarzbach (Polkwitz 1907- Bensberg 2003) mit dem gesamten Komplex auseinander (siehe auch Seibold 2004). Er bleibt in seinem klassischen Buch „Klima der Vorzeit“ (1950, 1961, und selbst noch 1974) bis zuletzt skeptisch, obwohl er zwei Vorzüge der „Hypothese“ hervorhebt, die Erklärung der mehrmaligen Vereisungen und die absolute Chronologie des Eiszeitalters. (1974,298). Auch mit Zeuner setzt er sich

auseinander, dessen Eintreten für die Strahlungskurve in „The Pleistocene Period“ er kritisiert. Zeuner wehrt sich in verschiedenen Briefen an ihn. Er sei kein „extreme and fundamental protagonist of the radiation curve“ und benütze oft „may“ oder „possibly“. „... As you put my views it looks as if I take the radiation curve from a hook in the wall and squeeze the Pleistocene evidence into it...“ (11.6. 1953, GA 61561)

Das Standardwerk für das Pleistozän in den USA war für Jahrzehnte die Monographie von R.F.Flint (1947, 1956). Darin werden 1947 sieben der bekannten Einwände zusammengefasst (506 ff). Einige wenige Geologen und Geographen in Deutschland und in England hätten die astronomische Theorie nicht nur prinzipiell, sondern sogar in Einzelheiten angenommen, doch sie könne neben gewichtigeren Gründen nur Modifikationen der Klimaschwankungen erklären (508). 1957 wiederholte er seine Einwände und zitierte weitere vier Gegner (508), darunter auch Penck (1938) und G.C. Simpson (1940). Anstrengungen, „einige offensichtliche Übereinstimmungen zwischen den Klimakurven in Tiefseesedimenten mit der Strahlungskurve herzustellen“, verwirft er beim derzeitigen Kenntnisstand.

In Europa konnten aber viele Bedenken ausgeräumt werden, da man die Strahlungskurve zwar als Schrittmacher für die pleistozänen Klimaschwankungen heranzog, aber nicht nur fragte, welche Strahlungsmenge zugeführt, sondern auch, was davon als Erwärmung übrig blieb. Man bezog auch das komplexe Geschehen mit Verstärkungs- oder Verzögerungseffekten mit ein. Der Einfluss der ruhenden und bewegten Atmosphäre oder des Ozeans, die Verteilung der Landmassen im Polarbereich wurden zusätzlich ins Spiel gebracht.

Der Durchbruch

Die Diskussion um die Deutung der klimatologischen Folgerungen aus der Strahlungskurve wurde zunächst nur mit Material vom Festland geführt. Flussterrassen brauchen aber nicht nur durch Aufschotterung in Glazialen zu entstehen. In Meeresnähe kann auch der interglaziale Anstieg des Meeresspiegels dazu führen. Tektonisches Auf und Ab mit Auswirkung auf Flüsse ist vom Klima unabhängig. Darauf hatte ja auch Penck (1938) hingewiesen. Eisvorstöße können ältere überfahren und damit deren Spuren vielfach auslöschen. Die absolute Datierung von Moränen war damals noch nicht möglich. Lössen werden oft genug umgelagert.

Welche Begeisterung über den Fund eines mehr oder weniger punktförmigen Vorkommens interglazialer Schichten in Meeresferne, den man durch Pollenanalyse, Floren- oder Faunenelemente datieren kann! Die Höttinger Breccie, der Cannstatter Sauerwasserkalk, der Ehringsdorfer Travertin wurden zum Beispiel herangezogen. Aus diesen Gründen verwundert das Hin und Her von ungenügenden Argumenten und eine

darauf folgende gewisse Ernüchterung nicht. (Flint 1947, 405) hatte die Anhänger aufgefordert, die Einwände auszuräumen: „These objections << against radiation curves >> are so serious that this method of establishing a chronology is of very limited value. The method can hardly be applied with confidence until its proponents have disposed of the evidence against it.“ Das geschah dann mit völlig neuen Ansätzen.

Manche der bisherigen Schwierigkeiten fallen nämlich in ozeanischen Ablagerungen weg. Durch das Studium immer längerer und kontinuierlicher Sedimentkerne aus allen Teilen des Weltmeers konnten immer mehr Belege dafür gefunden werden, dass sich Kalt- und Warmphasen, wie sie Milankovitch berechnet hatte, in Spuren der Paläoumwelt wiederfinden lassen. Dasselbe gilt für Eisbohrkerne von Grönland und von der Antarktis.

Der Umschwung, die Anerkennung der Auswirkungen der Strahlungskurve, kam daher nicht durch die klassische Festlandsgeologie. In ozeanischen Sedimentkernen wurden nicht nur Kalt- und Warmwasserfaunen von Foraminiferen herangezogen, sondern auch Temperaturhinweise aus $\delta^{18}\text{O}$ -Werten in planktischen oder benthischen Schalen. Noch wichtiger wurde für die zeitliche Gliederung, dass diese Werte Hinweise auf das jeweilige Eisvolumen auf dem Festland ergaben – und damit auch auf das Wasservolumen des Meeres, also auch auf die Höhe des Meeresspiegels. (Im Festlandeis wird bevorzugt ^{16}O gespeichert, was im Meerwasser und damit in den Schalen der Foraminiferen zu einer relativen Erhöhung von ^{18}O führt).

Im Inlandeis lieferten diese Isotopenverhältnisse gleichfalls Temperaturhinweise, wozu auch noch δD -Werte kamen. Der Gehalt an Staub, CO_2 , Methan und anderen Gasen ergänzten die Paläoumwelt-Informationen.

Zunächst gab es aber Schwierigkeiten mit der absoluten Datierung in all diesen Kernen. Die ^{14}C -Methode erfasste anfangs nur die jüngsten Abschnitte. Die

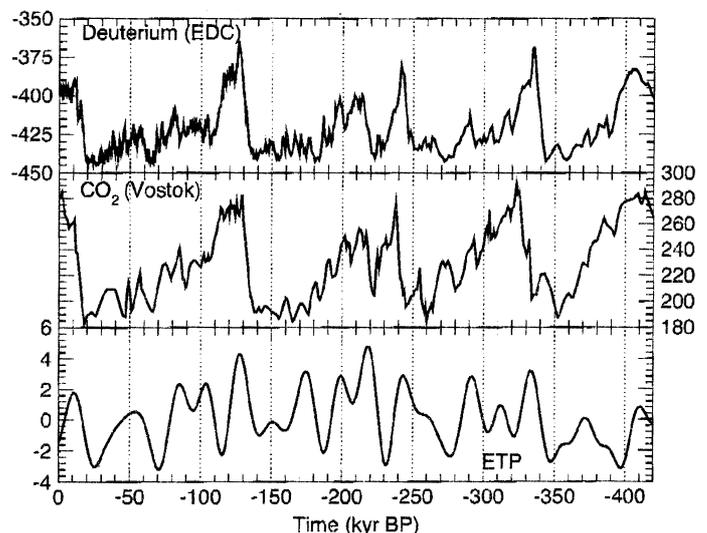
Entscheidung brachte in den Siebziger Jahren die Festlegung der paläomagnetischen Brunhes/Matuyama-Epochengrenze auf rund 0,783 Millionen Jahre und die Matuyama/Gauss-Grenze auf rund 2,43 Millionen Jahre. Dazu kamen einige zusätzliche paläomagnetische Events. Als Ergänzung konnte man durch die U/Th-Methode das absolute Alter einiger Korallenkalke aus interglazialen Hochständen des Meeres auf - 80 000, - 105 000 und - 125 000 Jahre festlegen. Unter Annahme konstanter Sedimentationsraten interpolierte man danach zwischen solchen zeitlichen Festmarken.

Verfeinerungen unter Verwendung der Spektralanalyse kamen hinzu. („TUNE-UP“- Timescale Hays et al 1976) und „SPECMAP“- $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven („Spectral Mapping Project“, Berger et al 1984). Die Berechtigung der Verwendung der Strahlungskurven für das Pleistozän wird daher heute allgemein anerkannt. Generell waren durch die Verwendung immer leistungsfähigerer Computer genauere Berechnungen der astronomischen Elemente und deren Auswirkung auf die Einstrahlung samt besseren Klimamodellen dazugekommen.

Ein Beispiel für die Übereinstimmung der Strahlungskurve mit Paläoklimadaten zeigt Abb. 3. Der Ehrgeiz, alles bis in die kleinsten Ausschläge hinein korrelieren zu wollen, wird durch die Einsicht gedämpft, dass zu diesen immer vorhandenen extraterrestrischen Einflüssen auch die Rückkopplung mit internen Mechanismen berücksichtigt werden muss, etwa der Einfluss der Cryosphäre, Atmosphäre oder des Ozeans - eine komplexe Aufgabe für die so aktiv gewordene Erdsystemforschung. Der Haupt-Wärmetransport vom Äquator zu den Polen wird durch Meeresströmungen, etwa den Golfstrom, übernommen. Der Austausch von Wassermassen zwischen dem Arktischen und dem Atlantischen Ozean spielt dabei eine entscheidende Rolle. Dies alles durch die Eiszeit hindurch zu modellieren, ist eine große Herausforderung.

Doch auch die Tatsachen, dass erst in den letzten 500 000 Jahren 100 000 Jahres-Periodizitäten auftreten und

Abb. 3 Strahlungskurve und Klimadaten aus Eiskernen
Deuteriumgehalte als Temperaturhinweise aus dem antarktischen Bohrkern „EPICA“-Dom, darunter CO_2 -Gehalt darin. Die Kombination aller drei Erdbahnparameter (ETP) für die letzten 400 000 Jahre ergibt diese Strahlungskurve. Nach EPICA Community Members (2004). ETP nach Berger (1978) und Imbrie et al (1984). Graphische Abstimmung a-c M.F. Loutre/M.Sarnthein, pers. Mitt



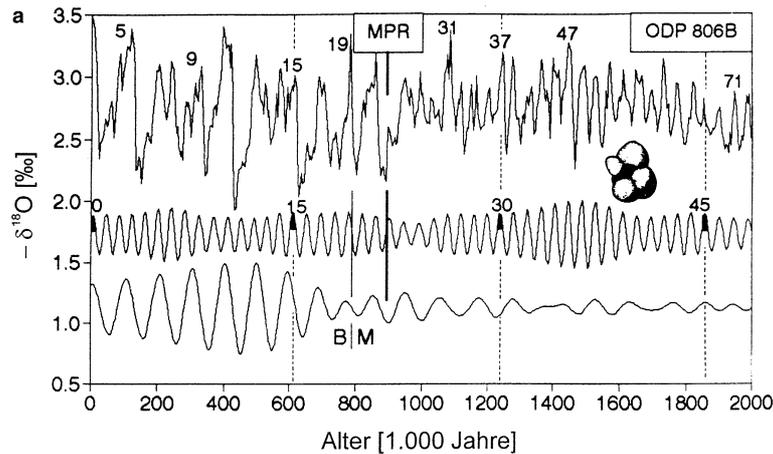


Abb. 4 Sauerstoff-Isotopenwerte und Strahlungskurven (a) Aus den Schalen der planktischen Foraminifere *Globigerina sacculifer* (Zeichnung) im Tiefseekern ODP 806B aus dem westpazifischen Ontong Java Plateau wurden für die letzten 2 Millionen Jahre Sauerstoffisotopenwerte bestimmt, hier versetzt um 1,5 Promille. Die Nummern bezeichnen Isotopenstadien der chronologischen Gliederung. (Das Auf und Ab der Kurve gibt die Schwankungen des Meeresspiegels mit einer Bandbreite von rund 120 Metern wieder.) Darunter die in den Mess-Serien enthaltenen dominierenden 41 000- und 100 000-Jahres- Zyklen. B/M = paläomagnetische Brunhes/Matuyama-Grenze (Klimaänderung bei rund 900 000 Jahren und Änderung der Amplitude bei rund 700 000 Jahren). Aus Berger und Wefer (1992)

davor andere, oder dass sich extreme Schwankungen erst vor rund 2,5 Millionen Jahren einstellten, stellen noch offene Fragen. (Abb. 4)

Trotzdem mehren sich die Versuche, die Verschiebung der gesamten Klimazonen nach Norden oder Süden und deren Effekte hinsichtlich Erosion oder Sedimentation auf der Basis von Milankovitch zu untersuchen (Perlmutter and Mathews 1992).

Darüber hinaus wird die astronomische Theorie zunehmend auch auf Epochen vor dem Pleistozän angewandt, etwa auf die Trias (Olsen 1986) oder die klimatisch extrem unterschiedliche Kreidezeit. (Herbert and Fischer (1986) oder Oglesby and Park 1992). So mutig war man aber auch schon sehr viel früher: Gilbert führte (1895) kretazische rhythmische Sedimente auf die Schwankungen der Präzession zurück!

Über diese Entwicklung würde sich - zumindest was das Pleistozän anbetrifft - Milankovitch freuen, aber auch alle seine frühen, dauernd angegriffenen Anhänger in Deutschland, Köppen, Soergel, Wundt und Zeuner.

Danksagung. Wir bedanken uns für Hinweise und Kommentare bei den Profs. Dr. Albrecht Kessler/Freiburg und Michael Sarnthein/Kiel, sowie bei Dr. Manfred Warth/Stuttgart. Wiederum wurden wir im Geologenarchiv durch Frau Dr. Kathrin Lutz und das Personal der Universitätsbibliothek Freiburg laufend unterstützt. In dankenswerter Weise wurden wieder viele einschlägige Materialien übereignet, so von Ingrid Ackermann/Göttingen; Helmut Bartenstein/Celle; Daniel Bernoulli/Basel; Erentraud Flügel-Kahler/Erlangen; Helmut W. Flügel/Graz; Franz Goerlich/Niederbachem;

Martin Guntau/Rostock; Reiner Jordan/Nettlingen; Thomas Kaemmel/Berlin; Franz Kockel/Hannover; Gaston Mayer/Karlsruhe; Marthe Melguen/Brest-Plouzané; Fritz A.Pfaffl/Zwiesel; Michael Sarnthein /Kiel; Ernst Schlegel/Berlin; Ursula Schmidt/Taufkirchen; D. Schumann/Darmstadt; Beate Schwarzbach/ Bergisch Gladbach; Ekbert Seibertz/Wolfsburg; Jean Thein-Ella Wurster/Bonn; Jörn Thiede/ Bremerhaven; Friedhelm Thiedig/Norderstedt; Gerhard Tischendorf/Zittau; Manfred Warth/Stuttgart; Karl Heinz Wedepohl/Göttingen; Helga Walger/Altenholz und Friedrich Wilhelm Wellmer/Hannover.

References

- Adhémard J (1842 und 1860) Révolution de la mer, déluges périodiques. Paris.1.Auflage 184, und 2. Auflage 359 S
 Ball R (1892) The cause of an Ice Age. London.2. Auflage 180 S
 Berger AL (1978) Long-term variations of daily insolation and Quaternary climate changes. J Atmos Si 35:2362–2367
 Berger WH, Wefer G (1992) Klimageschichte aus Tiefseesedimenten - Neues vom Ontong-Java-Plateau Westpazifik). Naturwissenschaften 79:541–550
 Berger A, Imbrie J, Hays J, Kukla G, Saltman B (Hrsgb) (1984) Milankovitch and climate. 2 Bände Reidel Dordrecht. (darin „SPECMAP“ 269–305)
 Croll J (1864) On the physical cause of the change of climate during geological epochs. Philos Mag 28:121–137
 Croll J (1875) Climate and time in their geological relations. A theory of secular changes of the Earth's climate. London 577 S
 Eberl B (1930) Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland. Filser Augsburg 427 S
 EPICA-Community members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. Nature 429:623–628
 Flint RF (1947) Glacial Geology and the Pleistocene Epoch. Wiley, New York, XVIII + 589 S,2.Auflage 1957, XIII + 553 S
 Gilbert GK (1895) Sedimentary measurement of Cretaceous time. J Geol 3:121–127
 Hays JD, Imbrie J, Shackleton N J (1976) Variations in the Earth's orbit: pace maker of the ice ages. Science 194:1121–1131
 Herbert TD, Fischer AG (1986) Milankovitch climatic origins of mid-Cretaceous black shale rhythms, central Italy. Nature 321:739–743
 Herschel JWW (1830) On the astronomical causes which may influence geological phenomena. Transact Geol Soc London 3/17
 Hildebrandt M (1901) Untersuchungen über die Eiszeiten der Erde, ihre Dauer und ihre Ursachen. L.A.Kuntze Berlin XII + 128 S

- Imbrie J, Hays JD, Martinson DG et al (1984) The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: A Berger et al (1984) 269–305
- Köppen W, Wegener A (1924) Die Klimate der geologischen Vorzeit. Bornträger Berlin 256 S
- Milankovitch M (1920) Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. (Acad. Yougoslave Sci.Arts,Zagreb) Paris 329 S
- Milankovitch M (1930) Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen. Handbuch Klimatologie I A, Berlin 176 S
- Milankovitch M (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Auswirkung auf das Eiszeitenproblem. Kgl.Serbische Akademie, Belgrad, Edit. spec. 133, 633 S
- Milankovitch Vasko (1995) Milutin Milankovitch - 1879–1958, European Geophysical Society. Katlenburg-Lindau, XXIII + 181 S. (Mit einem inhaltsreichen Vorwort von A. Berger)
- Oglesby RJ, Park J (1992) Cyclic sedimentation, climate and orbital insolation changes in the Cretaceous. Encyclopedia of Earth system sciences. San Diego 2:13–27
- Olsen PE (1986) A 40-million year lake record of Early Mesozoic orbital climatic forcing. Science 234:8842–848
- Penck A (1938) Die Strahlungstheorie und die geologische Zeitrechnung. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 321–350
- Penck A (1939) Eiszeit und Strahlungskurve. Forschungen und Fortschritte, Berlin 15 6:78–79
- Perlmutter MA, Matthews MD (1992) Global cyclostratigraphy. Encyclopedia of Earth system sciences. San Diego 2:379–393
- Pfannenstiel M (1968) Das Quartärgeologische Lebenswerk von Walter Wundt. Freiburger Universitätsblätter H.21:63–68
- Pilgrim L (1904) Versuch einer rechnerischen Behandlung des Eiszeitproblems. Jahresberichte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg, Stuttgart 60:26–117
- Schwarzbach M (1961) Das Klima der Vorzeit. Eine Einführung in die Paläoklimatologie. Stuttgart. 1. Auflage 211 S, (1961) 2. Auflage 275 S, (1974) 3. Auflage 380 S
- Simpson GC (1940) Possible causes of change in climate and their limitations. Linn Soc London Proc 152:190–219
- Soergel W (1919) Löss, Eiszeiten und paläolithische Kulturen. Eine Gliederung und Altersbestimmung der Löss. Fischer Jena, IX + 177 S
- Soergel W (1921) Die Ursachen der diluvialen Aufschotterung und Erosion, Bornträger Berlin, V + 74 S
- Soergel W (1924) Die diluvialen Terrassen der Ilm und ihre Bedeutung für die Gliederung des Eiszeitalters. Jena, 79 S
- Soergel W (1925) Die Gliederung und absolute Zeitrechnung des Eiszeitalters. Fortschritte der Geologie und Paläontologie, Berlin 13:125–251
- Soergel W (1937) Die Vereisungskurve. Bornträger Berlin 87 S
- Soergel W (1938) Das Eiszeitalter. Fischer Jena 56 S
- Soergel W (1939) Das diluviale System. Fortschritte der Geologie und Paläontologie, Berlin XII 39:155–292
- Spitaler R (1921) Das Klima des Eiszeitalters. Prag, Selbstverlag 138 S
- Spitaler R (1943) Die Bestrahlungskurve der Eiszeit nach Milankovitch und Spitaler. Abhandlungen Deutsche Akademie Wissenschaften Prag, 13, 18 S
- Steinmann G (1910) Die Eiszeit und der vorgeschichtliche Mensch. Teubner Leipzig, 96 S
- Troll C (1944) (Hrsgb) Diluvialgeologie und Klima- „Klimaheft.“ Geologische Rundschau Stuttgart 34, 7/8: 306–776
- Unger K P, Kahlke R D (1995) Thüringen. In: L. Benda (Hrsgb) Das Quartär Deutschlands. Bornträger Stuttgart XXI + 408 S
- Wundt W (1938) Das Reflexionsvermögen der Erde zur Eiszeit. Meteorol Z 55(3):81–87
- Wundt W (1944) Die Mitwirkung der Erdbahnelemente bei der Entstehung der Eiszeiten. Geologische Rundschau Stuttgart 34:713–747
- Wundt W (1958/59) Die Pencksche Eiszeitgliederung und die Strahlungskurve. Quartär 10(11): 25–26
- Zeuner FE (1935) The Pleistocene chronology of Central Europe. Geol Mag London 72:352–376
- Zeuner FE (1934) Das Klima des Eisvorlandes in den Glazialzeiten. Neues Jahrbuch Geologie und Paläontologie, Stuttgart, Beilageband 72:367–398
- Zeuner FE (1938) Die Chronologie des Pleistozäns. Bull. Acad. Serbe Sci math nat Belgrad, B 4, 79 S
- Zeuner FE (1939) Schwankungen der Sonnenstrahlung und des Klimas im Mittelmeer während des Quartärs. Geologische Rundschau Stuttgart 30:650–658
- Zeuner FE (1950) Dating the Past. London, XVIII + 474 S
- Zeuner FE (1959) The Pleistocene Period. London, XVIII + 447 S