

## Die Penck'sche Eiszeitgliederung und die Strahlungskurve

von *W. Wundt, Freiburg i. Br.*

### 1. Zielsetzung des Aufsatzes

Für die Gliederung der Eiszeit ist die empirische Einteilung Pencks in vier große Eisvorstöße noch heute von grundlegender Bedeutung. Andererseits hat die Strahlungskurve nach Milankovitch als Erklärung für diese Gliederung besondere Beachtung gefunden. In dem Jahre, in dem sich der Geburtstag Albrecht Pencks zum hundertsten Male jährt, liegt es nahe, Befund und Erklärung einander gegenüberzustellen und auf Grund neuerer Forschungen nachzuprüfen. Penck hat die Strahlungskurve aus Gründen, die gleich nachher besprochen werden sollen, abgelehnt. Er geriet dabei in Widerspruch zu Soergel, der sich mit seiner viel weitergehenden Gliederung gerade auf die Strahlungskurve stützte. Ich selbst versuchte, die Gegensätzlichkeiten der beiden Forscher aufzuklären: sie beruht zum großen Teil darauf, daß Penck den säkularen Gang der Jahresstrahlung (Sommer und Winter zusammen) betrachtete und dabei nur geringfügige Schwankungen fand, während nach Milankovitch eine Aufeinanderfolge kühler Sommer, unterstützt durch milde, schneereiche Winter, die Vereisungen herbeiführt. Man vergleiche dazu das Herabsteigen der Schneegrenze in maritimen Lagen bei geringen Jahresschwankungen der Temperatur. Eine Stütze für die Strahlungskurve in dem beschriebenen Sinn fand ich in der durch Reflexion an den Schneeflächen verstärkten Albedo der Erde. Soergel hat Penck auf diesen Sachverhalt aufmerksam gemacht und hat in einem (nicht veröffentlichten) Meinungs-austausch ein, mindestens teilweises, gegenseitiges Verständnis herbeigeführt. Im Anschluß daran hat Penck auch mir seine letzten Schriften (anderen Inhalts) zugesandt, woraus ich schließe, daß er bereit war, der astronomischen Theorie auch seinerseits Bedeutung zuzuerkennen. Die nach dem Tode Pencks eintretende Entwicklung soll hier kurz dargestellt werden. Wenn es der Forschung gelingen sollte, die heute noch bestehenden Diskrepanzen zwischen Erfahrung und Theorie zu überbrücken, so würde das den Weitblick des großen Forschers bestätigen, der zuerst den rhythmischen Ablauf der Eiszeiten durch den Augenschein im Gelände erkannte.

### 2. Die Strahlungskurve

nach Milankovitch (1) und nach Brouwer-van Woerkom (2)

Daß die Bestrahlung der Erde sich mit den Erdbahnelementen, d.h. mit der Neigung der Erdachse, der Exzentrizität der Erdbahn und der Lage des Perihels ändert, darf als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Die Schwankungen jener Elemente waren schon vor Milankovitch relativ gut bekannt und gestatteten ihm, die wechselnde

Strahlung bis sechshunderttausend Jahre vor der Gegenwart mit guter Annäherung zu berechnen. Ein unsicherer Faktor in der Berechnung blieb nur die Masse der Planeten, die erst in unserer Zeit schärfer bestimmt werden konnte. So erklärt es sich, daß die zuerst von Pilgrim aufgestellte und von Milankovitch-Mischkovitch verbesserte Strahlungskurve durch Brouwer und van Woerkom nochmals verfeinert werden konnte und wohl auch künftig noch kleine Änderungen erfahren wird. Doch herrscht schon bei den letztgenannten Autoren fast vollständige Übereinstimmung mit Milankovitch bezüglich der zeitlichen Lage der Strahlungsextreme in den letzten fünfhunderttausend Jahren. Nur in der Amplitude zeigen sich Unterschiede in der Art, daß die Ausschläge nach der neueren Berechnung zeitlich rückwärts immer kleiner werden. Daraus ergibt sich aber ein wichtiger Hinweis auf die Bedeutung der neuen Kurve von van Woerkom: wenn die Ausschläge vor 350 000 allgemein kleiner waren, andererseits die zwei älteren Penckschen Eiszeiten nach Milankovitch dort liegen sollen, dann muß eine neue Zuordnung versucht werden, welche alle vier Eiszeiten in der Zeit nach 350 000 mit ihren größeren Ausschlägen unterbringt [vgl. dazu Schwarzbach (3)]. Unter den Prähistorikern hat auf eine Nachprüfung der Zeitfrage besonders auch Menghin gedrungen, dem dieser Band des „Quartär“ gewidmet ist. — Übrigens lehnt van Woerkom eine klimatische Ausdeutung der von ihm neu berechneten Strahlungskurve ab. Die von ihm berechnete Abnahme der Amplituden wirkt sich natürlich auch auf die Eisbilanzkurve [Wundt (4b)] aus, die auf Grund der älteren Werte berechnet worden ist. Bei der von mir aufgestellten Summenkurve A in der dortigen Tafel, Seite 5, müssen sich die Kälteausschläge jetzt auf den späteren Zeitraum konzentrieren. Das dort angewandte Prinzip der zeitlichen Summierung der Effekte ist nicht erschüttert, aber ich konnte eine Neuberechnung bis jetzt nicht vornehmen, da die von van Woerkom mitgeteilten Daten dazu nicht voll ausreichen. Außerdem werden durch das Ineinandergreifen beider Halbkugeln (siehe Abschnitt 7) ganz neue Gesichtspunkte hereinkommen.

### 3. Parallelisierung der Eiszeiten mit der Kurve von Milankovitch

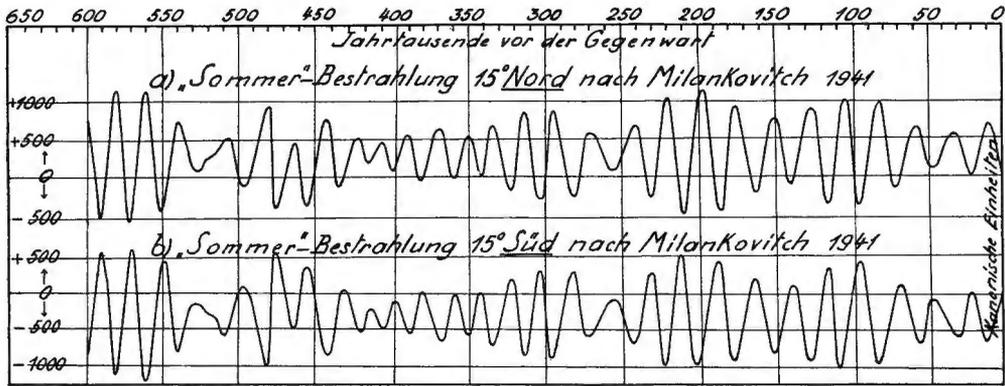
Die Zuordnung der Eiszeiten zu der Kurve Milankovitchs ist bekannt und in Tab. S. 18 wiedergegeben. Er faßte nach Köppen-Wegener die letzten drei Zacken als Würmeiszeit zusammen, die beiden vorangehenden als Rißeiszeit, die beiden folgenden — durch ein langes Intervall von Riß getrennt — als Mindeleiszeit und wiederum die folgenden als Günzeiszeit. Mit Recht ist hiergegen von verschiedenen Seiten, besonders von Klute, eingewandt worden, daß dann entweder die Gegenwart noch zur Würmvereisung gehören müßte, oder daß die Strahlungsanstiege zwischen den Würmphasen genügen müßten, an diesen Stellen volle Interglaziale hervorzurufen. Ähnlich steht es bei Riß I - Riß II usw. Ferner tritt bei einer Vollgliederung mit etwa zwölfmaligem Klimawechsel (nach Soergel) eine solche Fülle von Möglichkeiten der Parallelisierung auf, daß die Zuordnung im einzelnen nur noch sehr wenig überzeugt. Endlich wird als wichtiger Einwand gegen einen Einfluß der Strahlungskurve — auch gegen die nach van Woerkom — angeführt, daß gerade der letzte Vorstoß der Würmeiszeit (Salpaus-

selkä, Mankato) unzweifelhaft in die Nähe des postglazialen Strahlungsanstiegs (ca. 9000 v. Chr., elf Jahrtausende vor der Gegenwart) fällt. Jenem Eisvorstoß ging unmittelbar das Alleröd-Interstadial voraus und Firbas hat nachgewiesen, daß sich zu jener Zeit die Waldgrenze trotz starker Bestrahlung um rund 600 m wieder senkte. Wir werden später diesem Einwand mit Verspätungen zu begegnen suchen, die sich bei allen klimatischen Vorgängen finden und z. B. beim Jahresgang in Form von Kälte- und Wärmerückfällen auftreten.

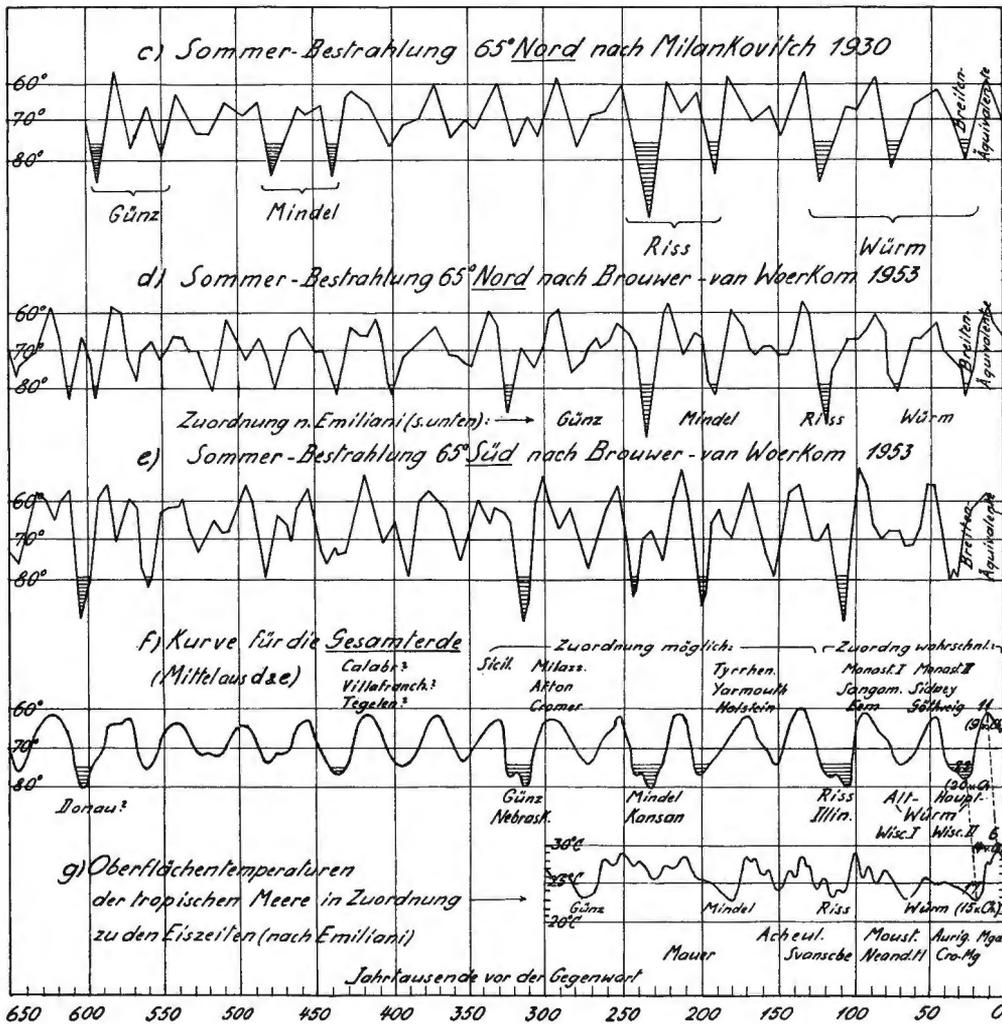
Ein Haupteinwand gegen die Strahlungskurve wird aber beim Übergang von Milankovitch zu van Woerkom hinfällig: man konnte sich bei Milankovitch nur schwer erklären, warum die Eiszeiten sich nicht auch rückwärts bis zum Tertiär fortsetzen. Diesem Einwand wird durch die neue Kurve der Boden größtenteils entzogen, da ja tatsächlich die Ausschläge vor 350 000 v. Chr., soweit berechnet, i. allg. kleiner werden. Außerdem bleibt aber für das Ausbleiben der Eiszeiten im Tertiär nach wie vor als Erklärung, daß die Erde eine gewisse Bereitschaft haben muß, um Eiszeiten überhaupt zu entwickeln. Eine solche fehlt (nach Kerner-Marilaun) in der Erdgeschichte dann, wenn die Meere sich ausdehnen. Sie nimmt zu mit der Vergrößerung der Landflächen, die allein imstande sind, größere Inlandeismassen zu bilden, außerdem zeitweise den Zustrom warmen Wassers zu den Polen unterbinden. Auf diesen letzten Punkt hat neuerdings auch Emiliani (4a, b, c, d) hingewiesen, auf dessen Untersuchungen wir jetzt zu sprechen kommen.

#### 4. Eiszeitforschung und Tiefseeforschung

Einen großen Fortschritt in der Eiszeitforschung hat die Untersuchung von Bohrkernen aus dem Grunde der Tiefsee gebracht (Arrhenius, Urey, Emiliani, Ewing, H. Suess u. a.): sie hat dort wie auf dem Lande zur Entdeckung eines Wechsels zwischen Kalt- und Warmzeiten geführt. Die Möglichkeit zu dieser Differenzierung gibt das Vorkommen der Sauerstoffisotope  $O^{16}$  und  $O^{18}$  im Kalk der zum Meeresgrund niedergesunkenen Foraminiferenreste. Das Verhältnis des  $O^{18}$  zum  $O^{16}$  hängt nämlich weitgehend von der Temperatur des Meeres ab, in dem diese Kleinwesen lebten. Man hält sich dabei an diejenigen Arten, die auch heute in den Oberflächenschichten leben und erst nach ihrem Tode zum Boden absinken. Außerdem wurden die Foraminiferen verschiedener Dimensionen gesondert betrachtet. Es ergaben sich dabei langfristige Wellen „kälterer“ und „wärmerer“ Arten im Aufbau der Bohrkern. Eine andere Methode benützt, wie bei der Pollenanalyse, das Auszählen aller Arten an der gleichen Stelle des Bohrkerns. Auch die tief unten lebenden Foraminiferen werden von Emiliani, der sich in der Hauptsache auf Ergebnisse aus dem Karibischen Meer und dem äquatorialen Atlantik stützt, für sich untersucht. Weil das Tiefenwasser durch geringen Austausch viel weniger in der Temperatur schwankt, können sie nur viel längere Perioden anzeigen als die Oberflächenwesen. Da ergibt sich nun, daß die Tiefentemperaturen seit etwa 65 Millionen Jahren ständig gesunken sind, und daß sich die Tiefstwerte eben im Schlußzeitraum finden, den wir der Eiszeit im ganzen zuschreiben. — Natürlich wird man fragen, wie die Forscher diese ungeheuren Zeitwerte gemessen haben. Für den



Die Bestrahlung in den Tropen



Die Strahlungskurve nach Breitenlagen und in ihrer historischen Entwicklung. Verschiedene Zuordnung der Kalt- und Warmzeiten.

letzten Zeitabschnitt geschieht dies mit der Radiokarbonmessung ( $C^{14}$ -Methode). Der letzte Gipfelpunkt der Eiszeit (Hauptwürm) ist mit etwa 15 000 v. Chr. ziemlich sicher bestimmt, ebenso der Höhepunkt der postglazialen Erwärmung mit 4000 v. Chr. Diese Zeitspanne wird als Grundwert bei den auf- und absteigenden Temperaturwellen benützt, und man erhält durch Extrapolation rückwärts bis 100 000 v. Chr. verhältnismäßig sichere Termine für den Klimaablauf. Aber sowohl bei diesem Zeitraum als bei den weniger sicheren Berechnungen für die vorausgehenden Zeiten erhält man Werte, die wesentlich niedriger sind, als man bisher angenommen hatte. Dies trifft auch für andere, mit der  $C^{14}$ -Methode vorgenommene Untersuchungen zu, die von den Folgerungen Emilianis unabhängig sind.

Vergleichen wir also die empirische Kurve Emilianis mit den Kurven Milankovitchs und van Woerkoms, so fällt die bessere Übereinstimmung mit der neueren Berechnung sofort ins Auge, eine Folge der Zusammendrängung der gesamten Vorgänge auf einen kürzeren Zeitraum. Folgen wir nun den Kurven van Woerkoms für die Nordhalbkugel nach dem Vorgang Emilianis kurz im einzelnen (Tabelle S. 18, d)! Es werden der Würmeiszeit im Gegensatz zu Milankovitch nur die beiden letzten Zacken zugeschrieben. Die Rißeiszeit, nur aus einer Zacke bestehend, liegt an der Stelle des früheren Würm I um 110 000 v. Chr. Der Mindeleiszeit wird in der Hauptsache die Stelle des früheren Riß zugeordnet und die Günzeiszeit wird mit einer vorausgehenden Zacke in Verbindung gebracht, wodurch die Haupteiszeiten nicht über 330 000 vor der Gegenwart hinausreichen.

Die Zuordnung dieser älteren Haupteiszeiten kann, wie ich zeigen werde, trotz grundsätzlicher Übereinstimmung auch in etwas anderer Weise als bei Emiliani vorgenommen werden. — Emiliani hat seinen Diagrammen auch Angaben über die Entwicklung der Kultur und des Menschen beigefügt. Einige dieser Angaben sind in der Tabelle Seite 18, g hier übernommen. Die zeitliche Zusammendrängung macht sich natürlich bemerkbar: u. a. wird der Mensch von Mauer, seiner Stellung im Günz-Mindel-Interglazial entsprechend, erst auf rund 200 000 vor der Gegenwart datiert.

##### 5. Differenzierung der Strahlung nach der Breitenlage. Zusammenwirken der Hemisphären

Man ging ursprünglich davon aus, daß das Klima der Breitenkreise im wesentlichen durch die ihnen selbst zukommende Bestrahlung bedingt sei, ohne zu berücksichtigen, daß das örtliche Klimabild ebenso sehr von den Austauschströmungen zwischen Pol und Äquator (im Meer und in der Luft) bestimmt wird. So wurde eine Auswirkung der Kaltzeiten in den Tropen zunächst für unmöglich gehalten. Man hat sich dann aber überzeugt, daß die Temperatursenkung, aus der Schneegrenzsenkung geschlossen, auch am Äquator bedeutend war und ungefähr  $4^{\circ}$  betrug, während sie in den höheren Breiten  $10^{\circ}$  und mehr erreichte [vgl. dazu Mortensen (6)]. Emiliani stellte in seinen davon ganz unabhängigen Forschungen fest, daß während der Kaltzeiten die Temperatur der Oberflächenschicht im tropischen Atlantik von rund  $25^{\circ}$  auf  $21^{\circ}$  sank. Wundt (4a) hatte aus der kombinierten Wirkung geringerer Zustrahlung und erhöhter Albedo

für die Gesamterde eine Temperatursenkung von ebenfalls etwa  $4^{\circ}$  berechnet. Bei der Albedo kommt neben der Vergrößerung der Schneeflächen auch eine verstärkte Bewölkung in Betracht. Hier fehlen noch weithin die Grundlagen. Es wird sich vor allem um die tiefliegenden Wolken einschließlich der Nebel handeln, die sich im Winter und darum auch in den Kaltzeiten aus den mittelhohen Breiten (den Hauptträgern der Vereisungen) in etwas niedrigere Breitenlage vorschieben. Die Westwindgürtel werden dann äquatorwärts gepreßt und rufen dort die den Eiszeiten entsprechenden Pluvialzeiten hervor.

Um die Tropenvergletscherung zu erklären, hat man auch nach Veränderung der Zustrahlung in den niedrigen Breiten gefragt. Milankovitch (1) wurde dadurch veranlaßt, die Eigenbestrahlung für  $15^{\circ}$  Nord und  $15^{\circ}$  Süd zu berechnen. Sie verläuft — was bisher nicht genügend beachtet worden ist — fast genau spiegelbildlich (siehe Tabelle S. 18, a und b). In diesen Breiten findet aber schon alljährlich — nicht bloß in langen Perioden — ein rascher Ausgleich statt. Besonders deutlich sehen wir dies beim Indischen Ozean. Der asiatische Sommermonsun verfrachtet nicht nur die feuchten Luftmassen der niedrigen Nordbreiten zum Festland hin, sondern nährt sich auch von rückwärts aus dem Südostpassat der anderen Hemisphäre. Umgekehrt drückt der asiatische Wintermonsun das ganze Strömungssystem in der Atmosphäre und im Meer auf die Südbreiten hinüber. Noch auf einen weiteren Punkt ist aufmerksam zu machen: Der kalorische Sommer, der die  $182\frac{1}{2}$  strahlungsreicheren Tage von ebenso viel strahlungsärmeren ausscheidet, existiert ja am Äquator gar nicht, sondern löst in zwei wärmere Vierteljahre auf, zwischen denen die beiden kälteren Vierteljahre liegen; daher Sommer (Tabelle S. 18, a und b) zwischen “ “! Unter diesen Umständen kann von vieltausendjährigen Schwankungen, welche die tropischen Nord- und Südbreiten scheiden sollen, gar keine Rede sein. Die Tropen waren, für sich betrachtet, immer ein Gebiet raschen Ausgleichs. Aber auch sie unterlagen auf die Dauer in gewissem Umfang der Kälte, die ihnen von Norden und von Süden durch Luft- und Meeresströmungen zugeführt wurde. Entscheidend für die Klimagestaltung der ganzen Erde sind die Kälteherde in den hohen Mittelbreiten. Hier bildet sich durch das Pendeln der Temperatur um den Nullpunkt ein Maximum an Schneeniederschlag, der dann im Wege der Selbstverstärkung Schnee- und Eisdecken gegen den Äquator hin vorschiebt. In den höchsten Breiten wird dieser Einfluß wieder schwächer, denn bei sehr tiefen Temperaturen nimmt der Gesamt- und damit auch der Schneeniederschlag wieder ab, was mit der Ausbildung vorwiegend antizyklonaler Zustände zusammenhängt (vgl. Nordgrönland, Inner-Antarktis). Die kritischen Breiten für die Ausbildung von Kaltzeiten liegen zwischen  $70^{\circ}$  und  $50^{\circ}$ , doch können sich die Inlandeisdecken bis  $40^{\circ}$  vorschieben. Beim Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten ist die Nordhalbkugel wegen der größeren Landflächen gegenüber der Südhalbkugel der stärkere Faktor. Die durch Landbedeckung am Pol und Bewölkung kältere Halbkugel, das heißt die Südhemisphäre, schiebt ihre Zirkulation auf Kosten der anderen Hemisphäre über den Äquator hinüber. Man vergleiche dazu die Lage des meteorologischen Äquators, der jetzt durchschnittlich zwischen  $5^{\circ}$  und  $10^{\circ}$  Nord liegt. Wir erkennen dieses Übergreifen, wie die

Untersuchungen von Wüst (8a, b) zeigen, auch in den Tiefseeströmungen, die vom Oberflächenaustausch weitgehend unabhängig sind. Zungen kalten Wassers dringen unter der Oberfläche weit in die Nordbreiten vor. Diese Strömungen haben, im Gegensatz zu denen der Oberfläche, säkularen, ja multimillennaren Charakter [vgl. Arrhenius (16) für den Pazifik]. Auch in kurzlebigen Erscheinungen, so den Einbrüchen kühler Luft im indischen und sudanesischen Sommer, beobachten wir eine Mitbeteiligung der Südhalbkugel. Etwas seltener kommt der umgekehrte Fall vor, wo Kaltluftmassen aus den von Flohn (9a, b) beschriebenen Höhenträgen von Norden her bis in die Tropen vordringen.

#### 6. Die zeitliche Einheit der Eiszeiten über die ganze Erde

Die Klimaänderungen in den höheren Breiten übertragen sich durch Luft- und Meeresströmungen auf die niedrigen. Die Kaltzeiten in den Tropen entstehen nicht aus ihrer eigenen Bestrahlung, sondern aus Kältezufuhr von Norden und von Süden her. Den Meeresströmungen kommt dabei wegen der großen Speicherfähigkeit des Wassers und der Tiefe des Meeres besondere Bedeutung zu (vgl. dazu den Perustrom, der auch heute kühles antarktisches Wasser bis zum Äquator hinführt).

Von dieser Betrachtungsweise ist es nur ein Schritt zu dem Schluß, daß Kalt- und Warmzeiten für die ganze Erde zwar nicht streng, aber doch annähernd gleichzeitig gewesen sein müssen. Das ist zunächst rein empirisch aus der Anordnung der Moränen zu folgern. Nach Woldstedt (7, S. 214) ist die Grenze zwischen Alt- und Jungmoränen auf beiden Halbkugeln in derselben Weise ausgebildet. Wir kommen dabei aber auch auf die Strahlungskurve zurück. Hier hat sich vielfach die Meinung eingenistet, daß die Erdbahnelemente für das Verhalten der beiden Halbkugeln schlechtweg ein entgegengesetztes Verhalten fordern. Die Sache liegt so: Die Neigung der Erdachse, als Haupteinfluß in den höheren Breiten maßgebend, wirkt auf beiden Halbkugeln gleichsinnig, die anderen Einflüsse (Perihel und Exzentrizität), in den niedrigeren Breiten vorherrschend, wirken dort gegensinnig. Aber in niedrigen Breiten tritt aus den geschilderten Gründen rascher Ausgleich ein; die Schneeflächen und damit die Selbstverstärkung sind kaum nennenswert und so können die gegensinnigen Einflüsse gar nicht zur Auswirkung kommen. Immerhin werden in den mittleren Breiten die gleichsinnigen Polareinflüsse etwas abgewandelt und so können in den hohen Mittelbreiten sowohl Unterschiede zwischen Nord- und Südhalbkugel als auch Abweichungen zwischen benachbarten Breiten vorkommen. Meinardus (10) hat schon im Klimaheft der „Geologischen Rundschau“ diese Verhältnisse in Isoplethen dargestellt und betont, daß die Verschiebungen der Zacken zwischen Nord- und Südhalbkugel fünftausend bis elftausend Jahre nicht überschreiten. Darüber lagert sich noch die in sich schwankende Allgemeinverschiebung von rund fünftausend Jahren durch klimatische Verspätungen, so daß die Unterschiede weiter verwischt werden. Die Rolle der beiden Halbkugeln erschöpft sich also, unbeschadet einer rohen Gleichzeitigkeit, darin, daß die eine Halbkugel mit einer Kaltzeit jeweils etwas vorseilt oder nachhinkt, mit

dieser aber auch mittelbar die andere Halbkugel beeinflusst. Wenn z. B. die Südhemisphäre abgekühlt wird zu einem Zeitpunkt, wo die Mittelbreiten der Nordhemisphäre schon einem Höhepunkt der Bestrahlung zustreben, dann wird die Ausbildung des nördlichen Klimaoptimums durch verstärkten Abfluß zum Äquator hintangehalten. In den strahlungsmäßig bedingten Wärmeanstieg schieben sich dann Kälterückfälle und Stillstandslagen des zurückweichenden Eises ein. Wir werden noch versuchen, die Warthe-Vereisung als einen von der Südhemisphäre gesteuerten Kälterückfall in der abklingenden Rißeiszeit zu deuten.

### 7. Allgemeine Bemerkungen

#### Eine gemittelte Strahlungskurve für die Gesamterde

Sämtliche Kurven der Tabelle S. 18 geben — wie schon begründet — nur den Gang der Sommerstrahlung wieder. Daß für die Breiten  $\pm 15^\circ$  die älteren Werte (von Milankovitch) verwendet wurden, ist zulässig, da es sich nur um einen gegenseitigen Vergleich handelt. Die dabei benützte „kanonische“ Einheit entspricht  $10,24 \text{ gcal/cm}^2$  [vgl. (10)]. Unter Gegenwart ist bei Milankovitch 1850 n. Chr., bei Emiliani 1950 n. Chr. zu verstehen. Für die näherliegende Vergangenheit sind einige Angaben in unserer Tabelle angeschrieben, die den aufgerundeten Wert zweitausend Jahre benützen.

Die Abweichungen der Zuordnungen Emilianis von den meinigen sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Emiliani stützt sich auf die Kurve  $65^\circ$  Nord, für mich war die gemittelte Kurve für die Gesamterde (s. nachher) maßgebend. Ferner benützt Emiliani außer den Oberflächentemperaturen der tropischen Meere auch Zeitangaben aus Pollenprofilen des Festlandes und Änderungen des Meeresspiegels auf Grund der Arbeiten von Pfannenstiel (15). Emiliani sieht wie ich die zeitliche Zuordnung nur bis Riß einschließlich rückwärts als einigermaßen gesichert an. — Die Auswirkung der Breitenäquivalente auf die Temperatur läßt sich in ihrer Größenordnung daraus abschätzen, daß die Jahrestemperatur vom Äquator zu den Polen in der Gegenwart je Breitengrad um etwa  $\frac{1}{2}^\circ \text{C}$  sinkt (im Durchschnitt, nicht im Einzelfall).

Van Woerkom hat im Hinblick auf die überragende Bedeutung hoher Mittelbreiten die Strahlung für  $65^\circ$  Nord und  $65^\circ$  Süd berechnet und diese Werte müssen auch für ein größeres Breitenintervall repräsentativ sein. Andererseits habe ich begründet, daß auch die Gesamthemisphären aufeinander einwirken, wobei aber der gegenseitige Einfluß der Nord- und Südtropen infolge raschen Ausgleichs nicht mit den Eiszeiten in Verbindung gebracht werden kann. Einen Anhaltspunkt für die klimatische Auswirkung auf die Gesamterde gibt die Mittelung der Strahlung in  $65^\circ$  Nord und  $65^\circ$  Süd (Tabelle f).

Es wird z. B. vereinfachend angenommen: Eine Südverschiebung des  $65^\circ$ -Nordkreises in einer nördlichen Kaltzeit um  $2^\circ$  wird durch eine Südverschiebung des  $65^\circ$ -Südkreises um  $2^\circ$  gegen den Südpol hin (südliche Warmzeit) gerade aufgehoben. Eine Südverschiebung des  $65^\circ$ -Nordkreises um  $6^\circ$  gleichzeitig mit einer Verschiebung des

65°-Südkreises um 4° gegen den Äquator hin entspricht einer Abkühlung für die Gesamterde um  $\frac{1}{2} \cdot (6^\circ + 4^\circ) = 5^\circ$ . Für die Mittelbreiten des Nordens wird natürlich der Einfluß von 65° Nord vorwiegen, aber auch hier sind schon Südeinflüsse mit im Spiel — denken wir daran, daß auch heute der Golfstrom einen großen Teil seines Wassers durch den abgelenkten Äquatorialstrom von der Südhemisphäre bezieht. In welchem Verhältnis der Süden bei uns in der Vergangenheit mitgewirkt hat, ist natürlich schwer zu sagen und dieser Anteil dürfte zeitlich und örtlich stark gewechselt haben. Allgemeine Überlegungen fordern eine Abwandlung der verschiedenen Strahlungskurven durch Strömungen in der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Bei den Klimakurven für die Vergangenheit handelt es sich um eine Grundwelle von etwa vierzigtausend Jahren, die durch Einflüsse mannigfacher Art örtlich und zeitlich abgeändert wird. — Bei der in Tabelle f vorgenommenen Mittelung werden die Amplituden gegenüber den Kurven der Halbkugeln kleiner, erreichen aber immer noch Beträge von rund 20° Breitenäquivalenten. Dies ist eine Folge der leichten zeitlichen Verschiebung (s. Abschnitt 6), welche Wellentäler und Wellenberge teilweise aufeinander fallen läßt.

#### 8. Der allgemeine Verlauf der Eiszeiten auf der Nordhalbkugel

Der Zeitraum für die großen Eiskomplexe ist in der gemittelten Kurve (Tabelle f) wie bei Emiliani (s. Abschnitt 4) auf die Zeit von 330 000 v. Chr. bis zur Gegenwart begrenzt. Vereinzelt treten auch vorher noch Kältezacken auf, so kurz vor 600 000 und 800 000 (letztere liegt schon außerhalb der Zeichnung). Aber die zeitlichen Abstände sind hier viel größer und eine Zuordnung der Kalt- und Warmzeiten zu der Kurve kann hier noch nicht vorgenommen werden; die Angaben in der Tafel sind daher mit einem Fragezeichen versehen. Dagegen heben sich die Zacken nach 330 000, die jetzt den Penckschen Eiszeiten zugeordnet werden, sehr deutlich ab. Von der Gegenwart ausgehend, finden wir um 4000 v. Chr. das postglaziale Klimaoptimum, um 15 000 v. Chr. das Hauptwürm, beide um etwa 5000 Jahre gegenüber den Strahlungsextremen verspätet. Nach einem kräftigen Interstadial (Göttweiger fossiler Boden) kommen wir um 60 000 vor der Gegenwart zum Altwürm, das nach den Kurven von van Woerkom etwas schwächer als das Hauptwürm. Das Altwürm wurde also vom Hauptwürm überfahren und bildet, unter diesem liegend, mit ihm die morphologische Einheit der Jungmoränen, soweit nicht Erosionsvorgänge, Solifluktion u. ä. die beiden Vorstöße getrennt hervortreten lassen. Zur weiteren Gliederung rückwärts bis zum Riß ist zunächst auf die Arbeit von Zeuner (11): „Riß or Würm“ hinzuweisen. Bis zum Altwürm reichen jetzt auch die Altersbestimmungen mit der Radiokarbonmethode, wobei Werte bis zweiundsiebzigtausend vor der Gegenwart auftreten — am Augustinsee in New Mexico, nach H. Groß (12). Den Anschluß zum vorausgehenden letzten Interglazial (Eem, Krems, Sangamon) gewinnen wir aus einem Profil im Nordost-Polder, der früheren Zuidersee, das bis über die Kaltperiode des Altwürm zurückreicht, ferner an

einem Profil im Brörup-Hotel-Moor (Dänemark), nach den Berichten von Groß (12), Andersen (13) und German (14). In diesen Berichten wird auch auf Mißverständnisse hingewiesen, bei denen „temperierte“ Schichten, die dem Göttweiger Interstadial synchron sind, teilweise als „Eem“ bezeichnet werden. Vergleicht man diese Aufschlüsse mit den bekannten „Herning“-Profilen von Jessen und Milthers, bei denen eine ältere „warme“ Schicht durch einen „kalten“ Horizont von der späteren, „temperierten“ Schicht getrennt ist, so kann kein Zweifel sein, daß wir hier die Äquivalente des warmen Interglazials und des Göttweiger Interstadials vor uns haben, die durch die Ablagerungen des Altwürms geschieden werden. Vollständig durchlaufende Altersbestimmungen nach der (verbesserten) Radiokarbonmethode sind allerdings für diese Schichtfolgen nicht bekannt, vielleicht auch noch nicht möglich gewesen. Aber es besteht doch mindestens die Wahrscheinlichkeit, daß spätere Messungen für das letzte Interglazial die Zeitlage 90 000—70 000 und für die Rißeiszeit die Zeitlage 120 000 bis 100 000 vor der Gegenwart bestätigen werden.

Gehen wir vom Riß aus rückwärts, so ist nach Überschreitung des „Großen Interglazials“ mit wechselnd-temperierten Zuständen eine Zuordnung des Mindel-Kansan auf 230 000 möglich, ebenso des Günz-Nebraskan auf 310 000, wobei nach der Entstehung der gemittelten Kurve Günz mehr eine Angelegenheit der Südhalbkugel, Mindel dagegen eine solche der Nordhalbkugel ist. Dabei muß man natürlich bei der Bewegung von den niederen zu den höheren Breiten der Nordhalbkugel die Mittelkurve im Sinn der  $+65^{\circ}$ -Kurve abwandeln. Nach einer — hier nicht wiedergegebenen — Versuchskurve, bei welcher der  $+65^{\circ}$ -Kurve gegenüber der  $-65^{\circ}$ -Kurve das doppelte Gewicht gegeben wird, tritt der Hauptvorstoß des Riß um 110 000 gegenüber dem ersten Vorstoß um 120 000 ganz zurück, wird zu einem nachträglichen Halt und kann dann als ein Äquivalent der Warthe-Vereisung angesehen werden, bei der ein großer Vorstoß auf der Südhemisphäre das Abschmelzen des Riß-Eises zunächst verhindert. Selbstverständlich sind dies vorläufig nur Hypothesen, die später weiter gestützt werden müßten.

### 9. Kleinere Schwankungen und Eisvorstöße

Eine Reihe von Stillstands- und Rückzugsphasen des Eises sind hier nicht erörtert. Ich nenne das Brandenburger, das Frankfurter, das Pommersche Stadium, die Rückzugsstadien in Dänemark, endlich das stark ausgeprägte Stadium in Mittelschweden und Finnland (Salpausselkä), das Penck mit seinem Geschnitzstadium in den Alpen verband. Nach der  $C^{14}$ -Methode ist es synchron mit dem Mankatostadium in Nordamerika. Zeitlich unmittelbar vor dem Salpausselkä liegt das Alleröd-Interstadial, mit einer Waldgrenze, die nach Firbas um 600 m höher lag. Dem Alleröd entspricht in Nordamerika das Two Creeks-Interstadial.

Alle diese Schwankungen können mit den Strahlungskurven nicht erklärt werden, dies schon deswegen, weil die Erdbahnelemente nur Auf- und Abstiege von mindestens 10 000 Jahren Dauer hervorbringen, während Alleröd, Salpausselkä u. ä. größenordnungsmäßig nur etwa 1000 Jahre umfassen. Auch die allerjüngste Schwankung,

als „kleine Eiszeit“ benannt und von etwa 1600—1850 n. Chr. dauernd, kann mit der Strahlungskurve nicht in Verbindung gebracht werden. Um die Bedeutung solcher Schwankungen innerhalb einer astronomischen Periode zu ermessen, vergleichen wir die zugehörigen Temperaturänderungen. Einer Senkung der Waldgrenze um 600 m entsprechen bei der Schneegrenze nur etwa 400 bis 500 m und damit bei der Temperatur etwa 2° bis 3°. Dagegen ist der Temperaturanstieg vom Vollglazial zum postglazialen Wärmeoptimum in der Nähe des Inlandeises auf mindestens 10° zu veranschlagen. Schwankungen jenes kleineren Ausmaßes können sich wohl zu allen Zeiten in die großen Perioden eingeschaltet haben. Bedenken wir, daß der jährlich eintretende europäische Sommermonsum die Temperatur der warmen Jahreszeit um rund 2° herabdrückt! — Diese Erscheinungen sind eine Folge ungleicher Erwärmung. Das Festland folgt dem Sonnenstand viel rascher als das Meer; hieraus entsteht ein unstetiger Zustand längs der Küsten, der dann in Europa durch Einbruch kühler Luft aus Nordwesten überwunden wird. Es handelt sich dabei nicht um eine allmähliche Abschwächung der Festlandserwärmung, sondern, wie die „Schafkälte“ des Juni im hundertjährigen Mittel zeigt, um plötzliche und zeitlich annähernd festliegende Temperaturstürze, die wir im größeren Maßstab auch im indischen Sommer finden. Der Vorgang vollzieht sich, wie vielfach in der Natur, in rhythmischem Ausgleich [vgl. Wundt (4c)] und hat seine letzte Ursache im Relief, d. h. in der unregelmäßigen Verteilung von Meer und Land. Ähnlich müssen wir uns den Verlauf des Postglazials vorstellen. Während das eisfrei gewordene Land dem astronomisch bedingten Strahlungsanstieg mit kurzer Verzögerung folgt, überschwemmen die noch vorhandenen Eis- und Schneeflächen und die noch kalten Meere dieses Land von Zeit zu Zeit mit kühlen Luftmassen, wobei auch die herrschenden Wind- und Meeresströmungen umgeworfen werden. — Temperatursprünge können wir im Kleinen örtlich im Gebirge beobachten, wo im Frühjahr blühende Wiesen neben alten Schneefeldern zu sehen sind. Beim Rhonegletscher konnte man in der Zeit, wo der Rückgang noch nicht so ausgesprochen war wie in den letzten Jahrzehnten, ein regelmäßiges Pendeln innerhalb des Jahres beobachten, wobei sich ein mittlerer Hochstand um den 20. Mai, ein mittlerer Tiefstand um Mitte Oktober einstellte. Daß der Gletscher noch im Mai eine Vorrückungstendenz zeigte, kann nicht eine Folge der Frühjahrswitterung, sondern nur der Speicherung von Kälte und Schnee im vorausgehenden Winter sein. Entsprechend war das Alleröd gewissermaßen ein vorzeitiger Frühling mit örtlich wenig gestörtem Strahlungsgenuß, die darauf folgende jüngere Tundrenzeit ein Wiedereinbruch winterlicher Verhältnisse durch advective Kälte. Wenn sich die jährlichen Temperaturminima in Polargegenden und in maritimen Lagen bis zu zwei Monaten gegen den Sonnenstand verspäten, so ist dies rund ein Sechstel der Jahresperiode. Verspätungen in entsprechenden Beträgen dürfen wir auch bei den astronomischen Perioden erwarten, die rund zwanzigtausend bzw. vierzigtausend Jahre umfassen. Damit sind die empirisch festgestellten allgemeinen Verspätungen um etwa fünftausend Jahre in ihrer Größenordnung erklärt, ebenso die Kälterückfälle, die sich in den allgemeinen Anstieg der Temperatur nach den Kaltzeiten einschalten.

Nachschrift: Erst bei der Korrektur kam mir der Band 9 (1958) von „Eiszeitalter und Gegenwart“ zu Gesicht. In mehreren Beiträgen wird dort von De Vries, Woldstedt und Groß auch zur Strahlungskurve Stellung genommen. De Vries bespricht zahlreiche neue Radiokarbonaten für verschiedene Fundorte und kommt zum Schluß, daß diese mit Emilianis Paläotemperaturkurve (und Milankovitchs Zeitskala) übereinstimmen. — Woldstedt und Groß dagegen bleiben gegenüber der Strahlungskurve auf dem ablehnenden Standpunkt, u. a. mit der Begründung, daß eine genaue Durchdatierung längerer Tiefsee-Bohrkerne noch nicht möglich sei. Ich bemerke dazu: bei der Beurteilung der Strahlungskurve muß man jetzt davon ausgehen, daß die neuere Berechnung durch Woerkom den für die Eiszeit maßgebenden Zeitraum auf rund die Hälfte (etwa 300 000 Jahre) zusammendrängt und mit ihren wenigen Interglazialen den wirklichen Befunden besser gerecht wird. Ferner muß die Sicherheit der Zuordnung von Kalt- und Warmzeiten zu den Klimazacken der Kurve mit der Entfernung von der Gegenwart mehr und mehr abnehmen (siehe Tabelle: wahrscheinliche — mögliche — keine Zuordnung). Dies trifft auch für die Parallelisierung mit den Tiefseesedimenten zu. — Der von mir neu hereingebrachte Gesichtspunkt ist der klimatische Ausgleich zwischen den verschiedenen Breiten, aber auch zwischen den beiden Halbkugeln; er begründet, auch von der Strahlungskurve aus gesehen, eine rohe Gleichzeitigkeit der Eisvorstöße auf den beiden Hemisphären.

#### Schrifttum (kleine Auswahl)

- (1) Milankovitch: Kanon der Erdbestahlung. 1941.
- (2) Van Woerkom: The Astronomical Theory of Climate Changes in Shapley: Climatic Changes, Cambridge 1953, S. 147.
- (3) Schwarzbach: s. Neues Jb. f. Geol. u. Paläont. Monatshefte Juni 1954, S. 17.
- (4) Wundt: a) s. Meteor. Zeitschr. 1938, H. 3.  
b) s. Quartär 5, 1951, S. 1.  
c) s. Dtsch. Geographentag Essen, Tagungsbericht 1953, S. 154.
- (5) Emiliani: a) s. Journal of Geology, Nov. 1955, S. 538.  
b) s. Science, May 1956, S. 924.  
c) s. Scientific American, Feb. 1958, S. 2.  
d) s. Journal of Geology, May 1958, S. 264.
- (6) Mortensen: s. Zeitschr. f. Geomorphologie, 1, H. 1, 1957, S. 44.
- (7) Woldstedt: Das Eiszeitalter I. 2. Aufl. 1954.
- (8) Wüst: a) s. Kieler Meeresforschungen 7, H. 1, 1950, S. 24.  
b) s. Naturwissenschaftliche Rundschau 1951, H. 3, S. 97.
- (9) Flohn: a) s. Geolog. Rundschau 40, 1952, S. 153.  
b) s. Erdkunde 7., 1953, S. 266.
- (10) Meinardus: s. Geolog. Rundschau (Klimaheft) 34, 1944, S. 748.
- (11) Zeuner: s. Eiszeitalter und Gegenwart 4/5, 1954, S. 98.
- (12) Groß: s. Eiszeitalter und Gegenwart 8, 1957, S. 141.
- (13) Andersen: s. Eiszeitalter und Gegenwart 8, 1957, S. 181.
- (14) German: s. Naturwissenschaftliche Rundschau 1958, H. 7, S. 77.
- (15) Pfannenstiel: Das Quartär der Levante I.  
Akad. Wiss. Mainz, Math. Nat. Klasse, 1952, Nr. 7.
- (16) Arrhenius, G.: Swedish Deep-Sea Exped. 1947/48, Repts. v. 5, fasc. 1, S. 227.