

Neuere Eiszeithypothesen ¹⁾

Von MARTIN SCHWARZBACH, Köln

Mit 7 Abbildungen

Zusammenfassung. Die Hypothesen zur Erklärung der großen Klimaschwankungen müssen davon ausgehen, daß es lang-, mittel- und kurzfristige Schwankungen gibt; diese verhalten sich zeitlich ungefähr wie 100 000 : 100 : 1. Fast alle gelten nur für die letzten 600 Mill. Jahre, d. h. nur für $\frac{1}{7}$ (oder noch weniger) der Erdgeschichte, da über das Klima des Präcambriums fast nichts bekannt ist. Ein Schema (Abb. 2) zeigt, welche Klimahypothesen möglich sind. Kritisch betrachtet werden folgende, seit 1961 neu konzipierte oder neu diskutierte Hypothesen: die von P. JORDAN, J. STEINER, Strahlungskurven, die Autocyklen-Hypothesen von TANNER und A. T. WILSON (als Autocyklen-Hypothesen werden solche bezeichnet, die durch einen automatisch ablaufenden Mechanismus einen zyklischen Wechsel von Glazialen und Interglazialen erklären), die Koinzidenz-Hypothese von R. W. FAIRBRIDGE, kontinentale Drift, vulkanischer Staub. Keine Hypothese befriedigt vollständig. Nach dem heutigen Stand der Kenntnisse scheinen zahlreiche Ursachen zusammenzuwirken (wie das ähnlich auch schon andere angenommen haben); das wird als *multilaterale Eiszeit-Entstehung* bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Gesamtklima der Erde seit dem späten Präcambrium nur geringe Schwankungen zeigte und erstaunlich konstant blieb (trotz großer lokaler Schwankungen in den höheren Mittelbreiten). Es ist möglich, daß der Wechsel von Glazialen und Interglazialen eine Besonderheit des Quartärs darstellt. Es erscheint auch denkbar, daß die Faktoren multilateraler Eiszeit-Entstehung kausal zusammenhängen, d. h. daß diese Hypothese eine provisorische Erklärung darstellt, die dem heutigen unvollkommenen Stand unserer Erkenntnisse entspricht und später vielleicht doch durch eine übergeordnete Eiszeithypothese ersetzt werden kann.

Summary. New Ice Age hypotheses. All theories for the explanation of great climatic changes have to consider that there are changes with long, median and short periods of time, the ratio between them being about 100.000 : 100 : 1. Moreover, these theories are only concerned with the last 600 mill. years, i. e. with only $\frac{1}{7}$ (or less) of the history of the Earth, for we know nearly nothing about the climates of the Precambrian Age. A diagram (fig. 2) shows what kind of theories are possible. There follows a critical examination of some new theories proposed since 1961 (and of some new discussions of old ones): (1) P. JORDAN, (2) J. STEINER, (3) about radiation curves, (4) autocyclic theories of TANNER and A. T. WILSON (autocyclic theories suppose an automatic mechanism for the cyclic change of glacials and interglacials; an older example for such a theory is that of EWING & DONN), (5) the coincidence theory of R. W. FAIRBRIDGE, (6) the theory of continental drift, (7) of volcanic dust. None of these theories gives a wholly satisfactory explanation. From the present state of our knowledge, it seems likely that numerous causes cooperate to build up an ice-age (as others have already supposed); this is termed here the "multilateral origin of an ice-age". An important fact supporting this conception is that the climates of the whole earth have shown relatively small changes since Precambrian times and have remained on the whole astonishingly constant in spite of great local changes between glacials and interglacials in the higher middle-latitudes. It seems possible that the change between glacials and interglacials is a particular characteristic of the Quaternary Age, and also that the factors lying behind a multilateral origin of an ice-age are not independent, but connected causally together. If so, the theory of multilateral origin would offer only a provisional explanation corresponding to the imperfect state of our present knowledge, and later on a single all-embracing cause might be found to replace the numerous ones described here.

Die Eiszeiten oder, genauer gesagt, die großen Klimaschwankungen der Erdgeschichte sind in erster Linie ein Forschungsgebiet der Geologen und — soweit es die letzte Eiszeit betrifft — der physischen Geographen. Im allerjüngsten Quartär treten auch die Meteorologen mit wesentlichen Beiträgen hinzu. Aber der größte Teil der Eiszeithypothesen stammt merkwürdigerweise nicht von Geologen und auch nicht von Meteorologen, sondern ausgerechnet von den Vertretern exakter Naturwissenschaften: von Physikern, Geophysikern, Astronomen. Die Ursache liegt wohl nicht darin, daß die Geologen zu wenig

¹⁾ Vortrag, gehalten auf der Tagung der Deutschen Quartärvereinigung am 8. August 1968 in Biberach (Riß).

Phantasie und Einbildungskraft haben. Vielmehr ist einer der Gründe darin zu sehen, daß sie besser als die Nichtgeologen überblicken, wie unsicher und zwangsläufig auch ganz lückenhaft die Beobachtungstatsachen sind, und daß sie daher gar nicht wagen würden, darüber ein Gedankengebäude zu errichten, das dem Fernerstehenden leicht aus der Feder fließt (wenn man so sagen darf); denn je weniger man weiß, desto leichter entsteht eine Hypothese. Eine zweite Ursache liegt in der Tatsache, daß weiterführende Gedanken auch sonst eher von den Nachbarwissenschaften kommen.

Man kann diese Überlegungen auch anders ausdrücken: die Frage „Wie rekonstruiert man eine Eiszeit?“ wird im wesentlichen von den Geologen beantwortet; dagegen die Frage „Wie konstruiert man eine Eiszeit?“²⁾ von den Nichtgeologen.

Die Zahl der Eiszeithypothesen wächst noch immer. Ein von mir schon früher veröffentlichtes Diagramm, ergänzt bis 1968, deutet darauf hin, daß wir uns z. Z. in einem Stadium relativ reger Aktivität der Hypothesenbildung befinden.

Einige Voraussetzungen für Klimahypothesen

Die Klimahypothesen müssen berücksichtigen, daß es Klimaschwankungen sehr verschiedener zeitlicher Größenordnung gibt:

1. langfristige Klimaschwankungen etwa von der Größenordnung einiger 10 Mill. oder 100 Mill. Jahren,
2. mittelfristige Schwankungen, meist einige 10 000 bis 100 000 Jahre lang,
3. kurzfristige Schwankungen mit Perioden von einigen 100 oder 1000 Jahren.

Die drei Gruppen verhalten sich also zeitlich im Durchschnitt ungefähr wie 100 000 : 100 : 1. Dabei will ich von der Unterscheidung der periodischen Klimaschwankungen und der mehr einseitigen Klimaänderung absehen; diese Unterscheidung ist gar nicht immer möglich. Die generelle Temperaturabnahme im Tertiär z. B. erscheint, vom Quartär her gesehen, als Klimaänderung, aber im Rahmen der gesamten Erdgeschichte gehört sie vermutlich zu einer Klimaschwankung.

Klimageschichte

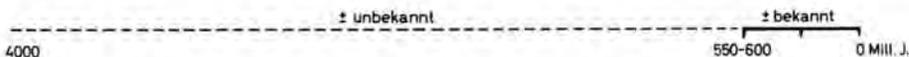


Abb. 1. Höchstens für $\frac{1}{7}$ der Erdgeschichte ist die Klimageschichte bekannt. - At best, $\frac{1}{7}$ of the climatic history of the earth is known.

Die drei zeitlich einigermaßen genau fixierten Eiszeitalter der Erdgeschichte (Quartär, Karbon-Perm, Eocambrium) verteilen sich mit je ca. 275 Mill. Jahren Abstand auf die letzten 550—600 Mill. Jahre. Das bedeutet, daß nur $\frac{1}{7}$ (oder noch weniger) der Erdgeschichte paläoklimatisch überblickbar ist, denn über das Klima des Präcambriums weiß man fast nichts (Abb. 1). Auch die Klimahypothesen gelten daher allermeist nur für den Zeitraum seit dem späten Präcambrium.

Das Schema (Abb. 2) soll kurz zeigen, welche hauptsächlichlichen Möglichkeiten bestehen, um Klimaschwankungen hervorzurufen. Die primäre Sonnenstrahlung kann konstant bleiben (1—6), ja, sogar die Sonnenstrahlung, die auf der Erdoberfläche eintrifft, und erst Änderung der Breitenlage eines Ortes, etwa durch kontinentale Drift, führt dann zu lokalem Klimawechsel (1). Die Neigung der Erdachse kann sich unperiodisch (2) oder

²⁾ Die Formulierung der zweiten Frage ("How to construct an ice age") stammt von Harlow SHAPLEY (1953).

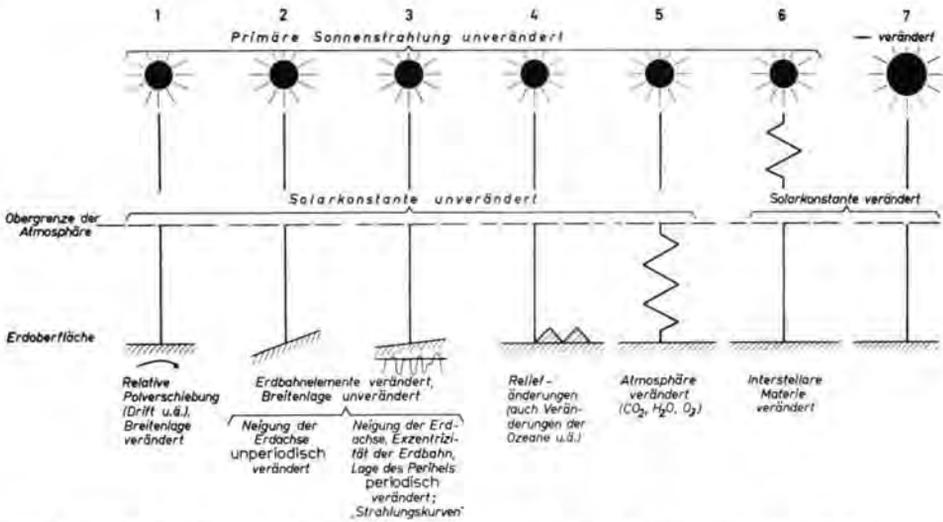


Abb. 2. Mögliche Eiszeithypothesen. - Possible ice-age theories. Primary radiation of the sun not changed (1-6) or changed (7); solar constant not changed (1-5) or changed (6-7). 1 = continental drift etc., 2-3 = orbital variations; 4 = variations of relief, 5 = of atmosphere, 6 = of interstellar matter.

periodisch und dann in Verbindung mit anderen Erdbahnelementen ändern; das ergäbe die Strahlungskurven (3). Das Relief kann wechseln (4) oder die Zusammensetzung der Atmosphäre (etwa der Gehalt an CO₂ oder Ozon oder vulkanischem Staub (5) oder die Zusammensetzung des interstellaren Raumes (6). Schließlich kann auch die primäre Sonnenstrahlung schwanken (7). Der theoretischen Möglichkeiten gibt es also viele.

Nur wenige neuere oder in den letzten Jahren neu in den Vordergrund getretene Hypothesen sind im folgenden herausgegriffen (für die Zeit bis 1961 vgl. man die Übersicht in SCHWARZBACH 1961 bzw. 1963). Die kurzfristigen Klimaänderungen der historischen Zeit, die vor allem die Meteorologen eingehend untersuchten, wurden nicht berücksichtigt.

Pascual JORDAN's Hypothese (Abb. 3)

Die langfristigen Klimaschwankungen erklärte u. a. Pascual JORDAN (zuletzt 1966) mit einer kontinuierlichen Abnahme der Sonnenstrahlung im Zusammenhang mit einer Abnahme der Gravitationskonstante. Diese primäre Ursache, deren Annahme auf DIRAC zurückgeht, schließt außerdem eine Expansion der Erde ein — im ganzen also eine hochinteressante Gedankenkonstruktion. JORDAN schließt sich der Annahme an, daß im Anfangsstadium die höhere Sonnenstrahlung eine dichte Wolkendecke und diese wiederum ein überaus gleichmäßiges Klima auf der Erde hervorrief. Das soll bis zum Karbon-Perm der Fall gewesen sein, und mächtige Hagelfälle im Äquatorialgebiet hätten dort die permokarbonischen Gletscher erzeugt. Ich erwähne Pasc. JORDAN's Hypothese nur, ohne nochmals im einzelnen auf sie einzugehen; sie ist — soweit sie die Gondwana-Vereisungen betrifft — meteorologisch unglauwbildig, steht zu geologischen Beobachtungen in Widerspruch und ist überhaupt geologisch zu sorglos begründet (vgl. dazu Geol. Rdsch. 54, 1965, S. 142 ff.).

Die quartären Vereisungen wären nach JORDAN ganz anders, nämlich dadurch entstanden, daß ein Schwellenwert unterschritten wurde, der MILANKOVITCH's Strahlungskurven zur Wirksamkeit brachte.

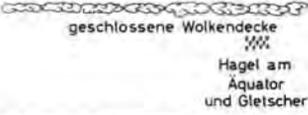
Gravitationskonstante g (nach DIRAC)		abnehmend →	
Volumen der Erde		zunehmend (Expansion) →	
Sonnenstrahlung		abnehmend →	
Pasc. Jordan		geschlossene Wolkendecke Hagel am Äquator und Gletscher	
	Präcambrium	Karbon-Perm	Quartär

Abb. 3. P. JORDAN's Hypothese. - P. JORDAN's hypothesis. Gravitation - constant g decreasing, volume of the earth increasing, radiation of the sun decreasing; closed cloud cover till Permian.

Im Gegensatz zu der Hypothese abnehmender Sonnenstrahlung steht, wie hinzugefügt sei, die Annahme, daß die Sonnenstrahlung seit dem Präcambrium — abgesehen von Einzelschwankungen — im ganzen zunimmt. Das wird seit langem u. a. von dem Astronomen E. J. ÖPIK vertreten (zuletzt 1965).

J. STEINER's Hypothese (Abb. 4)

Eine ganz witzige Hypothese, die abermals an die DIRAC'sche Annahme anschließt, ist vor kurzem in einer australischen Zeitschrift von J. STEINER veröffentlicht worden. Auch er rechnet mit einer Änderung der Sonnenstrahlung infolge der abnehmenden Gravitationskonstante, aber er macht noch eine zweite Annahme, nämlich die, daß durch die Rotation des Milchstraßensystems und die dadurch wechselnde Lage des Sonnensystems innerhalb der Galaxis zusätzlich eine Änderung der Gravitationskonstante eintritt und damit eine zusätzliche Änderung der Sonnenstrahlung. Die Rotationszeit beträgt ungefähr — ganz genau läßt sich das nicht sagen — 280 Mill. Jahre, d. h. sie entspricht überraschenderweise ziemlich genau dem zeitlichen Abstand zwischen quartärem und karbonisch-permischem Eiszeitalter. Noch merkwürdiger ist es ja, daß das

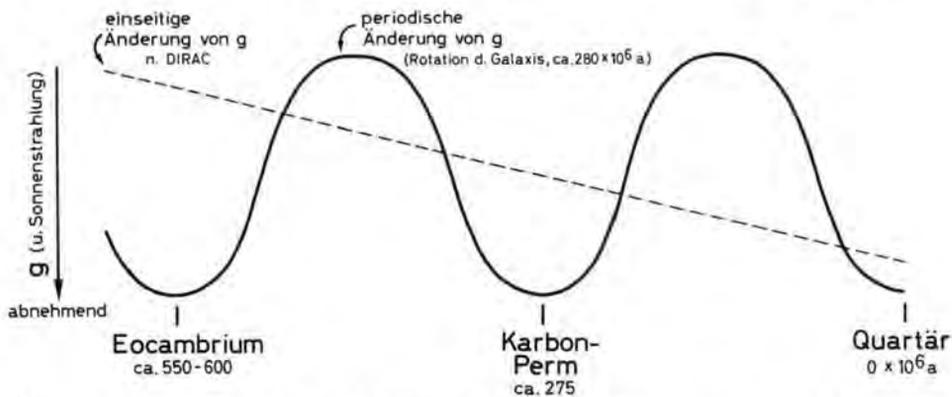


Abb. 4. J. STEINER's Hypothese (zeitlich erweitert). - J. STEINER's hypothesis (extended to the Eocambrian by the present author). Onesided and periodical variation of g .

eocambische Eiszeitalter abermals um diesen Betrag zurückliegt. So weit ist STEINER allerdings nicht gegangen, aber wenn man nicht annehmen will, daß die 3 großen Eiszeitalter zufällig gleichen Abstand haben, so wären die kausalen Zusammenhänge zwischen der Rotation der Galaxis und Schwankungen der Sonnenstrahlung, wie sie STEINER annimmt, eine überraschende und scheinbar bestechende Erklärung. Auf die zeitlichen Parallelitäten hat übrigens auch schon LUNGERSHAUSEN hingewiesen, ohne indes auf die Ursachen genauer einzugehen. Es muß jedoch hinzugefügt werden, daß eine Nachprüfung der theoretisch-physikalischen Grundlage, wie mir Prof. HÖNL aus Freiburg freundlicherweise mitteilte, gezeigt hat, daß der von STEINER herangezogene Effekt vermutlich viel zu klein ist, um wesentliche Schwankungen der Sonnenstrahlung hervorzurufen.

Neues zu den Strahlungskurven

Die mittelfristigen Klimaschwankungen umfassen als wichtigste den Wechsel von Eis- und Zwischeneiszeiten im Quartär, also einen ausgesprochenen zyklischen Klimawechsel. Man kann die Ursache in Schwankungen der primären Sonnenstrahlung sehen, d. h. in einer Art von „Flackern“ der Sonne (so E. J. ÖPIK). Davon abgesehen, bieten sich für ihre Erklärung besonders zwei Gruppen von Hypothesen an. Zunächst einmal die schon bei P. JORDAN kurz erwähnten astronomischen auf Grund der „Strahlungskurven“ von MILANKOVITCH. Wenn man eine neuere himmelsmechanische Zusatzannahme des Ungarn BACZÁK hinzufügt, gelten die Strahlungskurven-Hypothesen übrigens auch für langfristige Schwankungen.

WOLDSTEDT u. a. lehnen die paläoklimatologische Ausdeutung der Strahlungskurven völlig ab, vielleicht nicht immer mit ganz stichhaltigen Argumenten. Dagegen hat E. A. BERNARD (1962) versucht, ihre Gültigkeit für die tropischen Pluviale und Interpluviale Afrikas nachzuweisen, und auch manche Amerikaner ziehen sie neuerdings wieder heran. Die daraus resultierenden Datierungen stehen freilich mit anderen Zeitangaben zum Teil in unüberbrückbarem Gegensatz: EMILIANI gibt dem Günz ein Alter von 300 000, WOLDSTEDT dagegen von 700 000 Jahren! BROECKER versuchte durch eine geschickte Manipulation, die Strahlungskurven dem geologischen Zeitschema besser anzupassen; er meinte, man müsse die Präzession der Tag- und Nachtgleiche höher bewerten als die Änderung der Erdachsen-Neigung, und er konnte auf diese Weise schließlich einen Schönheitsfehler ausbügeln, nämlich MILANKOVITCH's Strahlungsmaximum bei 48 000 Jahren, das in EMILIANI's Temperaturkurven fehlt. Außerdem nahm er (ähnlich wie schon frühere Bearbeiter) an, daß nur die besonders großen Ausschläge der Kurve einen Umschwung von glazialen zu interglazialen Verhältnissen (und umgekehrt) bewirken. Aber man muß doch sagen, daß der Glanz der Strahlungskurven um so mehr verblaßt, je mehr man daran herumspielt. Tatsächlich ist es schwer zu verstehen, warum BROECKER und andere von „guter Übereinstimmung“ der Strahlungskurven und den Paläotemperaturkurven der Tiefseesedimente sprechen. Besonders kritisch haben DONN & SHAW (1967) die Korrelationen EMILIANI's betrachtet, ebenso E. J. ÖPIK (1965), der nicht zu Unrecht von einer „Magie der Koinzidenzen“ spricht.

Autocyklen-Hypothesen

Eine zweite, besonders in Nordamerika in den letzten Jahren neu entstandene Gruppe von Hypothesen für mittelfristige Klimaschwankungen arbeitet mit einem automatisch ablaufenden Mechanismus, bei dem das Wachstum der Gletscher von allein aufhört und rückläufig wird, sobald ein bestimmtes Maximum erreicht ist; nach dem darauf folgenden Minimalstand erfolgt ebenso automatisch erneutes Vorrücken. Es handelt sich also um selbständig gesteuerte zyklische Prozesse. Ich möchte die entsprechenden Hypothesen daher als Autocyklen-Hypothesen bezeichnen. Solche Hypothesen sind u. a. von EWING & DONN und (für CO₂) von PLASS gegeben worden; zu beiden

habe ich schon früher Stellung genommen. Zwei andere stammen von TANNER und von WILSON.

Es ist interessant, daß die Autocyklen- und die Strahlungskurven-Hypothesen manches gemeinsam haben, obgleich ihr Prinzip völlig verschieden ist. Erstens müssen nämlich beide zusätzlich erklären, warum sie erst seit Beginn des Quartärs wirksam werden, und zweitens wird wenigstens z. T. angenommen, daß entweder die Nord- oder aber die Süd-Halbkugel den Klimagang der ganzen Erde steuert (Nord-Halbkugel: ZEUNER u. a. in Bezug auf die Strahlungskurven, EWING & DONN, TANNER; Süd-Halbkugel: WILSON).

Übrigens hat kürzlich F. H. DORMAN (1968 darauf hingewiesen, daß auch ein (langfristiger) Zyklus von 30×10^6 a vielleicht durch einen autocyklischen Vorgang erklärt werden könnte. Dabei geht DORMAN vom CO_2 -Gehalt der Atmosphäre aus. Aber schon der Ausgangspunkt der Überlegungen — die Existenz eines 30×10^6 a-Cyklus — ist nicht sehr sicher begründet.

TANNER'S Hypothese (Abb. 5)

Bei der Autocyklen-Hypothese von W. F. TANNER (1965) wird vom pleistozänen nord-europäischen und nordamerikanischen Inlandeis ausgegangen und angenommen, daß dessen Ernährung vor allem durch die niederschlagbringenden Winde an ihrem Südrand erfolgte. Das Eis strömte also zu seiner „Quelle“ hin. Nach einer bestimmten Zeit gerät das vordringende Eis jedoch in zu warme Breiten; das Wachstum hört auf. Isostatisches Absinken des Untergrundes begünstigt das Rückschmelzen und verlängert das Interglazial.

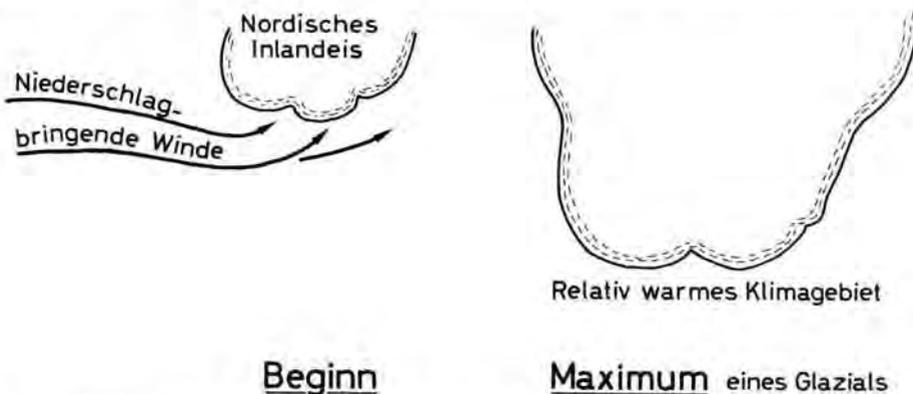


Abb. 5. Autocyklen-Hypothese von W. F. TANNER. — W. F. TANNER's autocyclic hypothesis. Snow-bringing winds; beginning and maximum of a Quaternary glacial.

Erst nachdem der Untergrund die ursprüngliche Höhe wieder erreicht hat, beginnt das Vorrücken von neuem. In solchen Insel-Gebieten wie Grönland und Antarktis, die nicht in warme Regionen hineinragen, ist der Mechanismus nicht wirksam; dort bilden sich permanente Eisschilde.

A. T. WILSON'S Hypothese (Abb. 6)

Gerade entgegengesetzt verlegt A. T. WILSON (1964) den Motor des eiszeitlichen Klimawechsels in die Antarktis. Das antarktische Inlandeis wird nach seiner Meinung instabil, wenn es zu mächtig wird (mächtiger als heute), denn dann erreicht es an der Basis den Schmelzpunkt. Nach allen Seiten schieben sich gewaltige Schelfeis-Massen vor (ähnlich wie das heutige Roßeis), und zwar bis zur antarktischen Konvergenz (der heute bei etwa 50° s. Br. gelegenen Grenze zwischen dem $8-10^\circ$ warmen Wasser der südlichen Ozeane und dem viel kälteren Wasser in der Umgebung der Antarktis). Damit

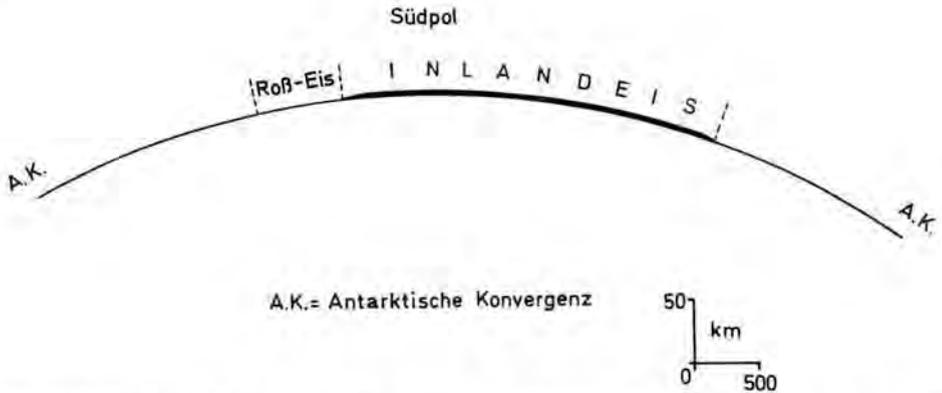


Abb. 6. A. T. WILSON's Hypothese. Profil durch das antarktische Inlandeis und das ausgepreßte „glaziale“ Schelfeis; Eisdicke 10 x überhöht. - A. T. WILSON's hypothesis. Profile through the Antarctic inland ice and the "glacial" shelf ice, thickness of the ice 10 x exaggerated. A. K. = antarctic convergence.

wird die Albedo der Erde erheblich erhöht, die irdische Gesamttemperatur erniedrigt und die Vereisung der Nordhalbkugel und damit der Beginn eines Glazials eingeleitet. Der Zustand ist aber nicht stabil, da im antarktischen Eisschild das ausfließende Eis ja zunächst durch kaltes Eis ersetzt wird; dadurch hört der Nachschub auf, der Eisschelf wird durch Kalbung abgebaut, die Albedo vermindert, die Gesamttemperatur der Erde erhöht — ein Interglazial beginnt.

Nur ein großer Eisschild kann dieses Wechselspiel hervorrufen, d. h. es begann erst, als der antarktische Kontinent symmetrisch zum Südpol lag. Im Tertiär kam es bei kleineren Eisschilden nur zu kleineren zyklischen Bewegungen, die vielleicht zyklische Sedimentation (Cyclotheme) in anderen Gebieten verursachten.

Die Hypothese funktioniert nur, wenn wirklich ein großer Eisschild bei übergroßer Dicke so weit auseinanderfließt, daß sich die Eisfläche gewaltig vergrößert. Sehr wahrscheinlich ist das wohl kaum — am allerwenigsten bei dem gebirgigen Relief, dem das antarktische Inlandeis aufliegt.

Koinzidenz-Hypothese (R. H. W. FAIRBRIDGE).

Für einige der Autocyklen-Hypothesen ist es eine wesentliche Voraussetzung, daß ein antarktischer Kontinent vorhanden ist (so WILSON) oder ein arktisches Meeresbecken (so EWING & DONN), ja, sie begründen den Eintritt der quartären Vereisungen (wie früher schon KÖPPEN & WEGENER) sogar damit, daß am Ende des Tertiärs diese Konstellation infolge kontinentaler Drift erreicht wurde. Solche Drift in so junger Zeit läßt sich freilich sonst kaum wahrscheinlich machen, weder aus geologischen noch aus paläomagnetischen Gründen. Andererseits muß die heutige Verteilung von Land und Meer an den beiden Polen sicher große Bedeutung für die Klimaverhältnisse haben (und auch die Heraushebung der Antarktis, die KREMP 1964, allerdings ohne sonstige schlüssige Hinweise, ins ausgehende Tertiär stellt). Rhodes FAIRBRIDGE hat in diesem Zusammenhang von einer Polar-Koinzidenz-Theorie gesprochen, wobei er der antarktischen Koinzidenz die Hauptrolle zuschreibt.

Ich möchte annehmen, daß die polare Koinzidenz zwar eine wichtige Rolle im Quartär spielt und z. B. die Konstanz des antarktischen Eises, das auch die Interglazial-Zeiten überdauerte, von ausschlaggebender Bedeutung ist, daß aber die großen, langfristigen Klimaschwankungen nicht davon abhängen.

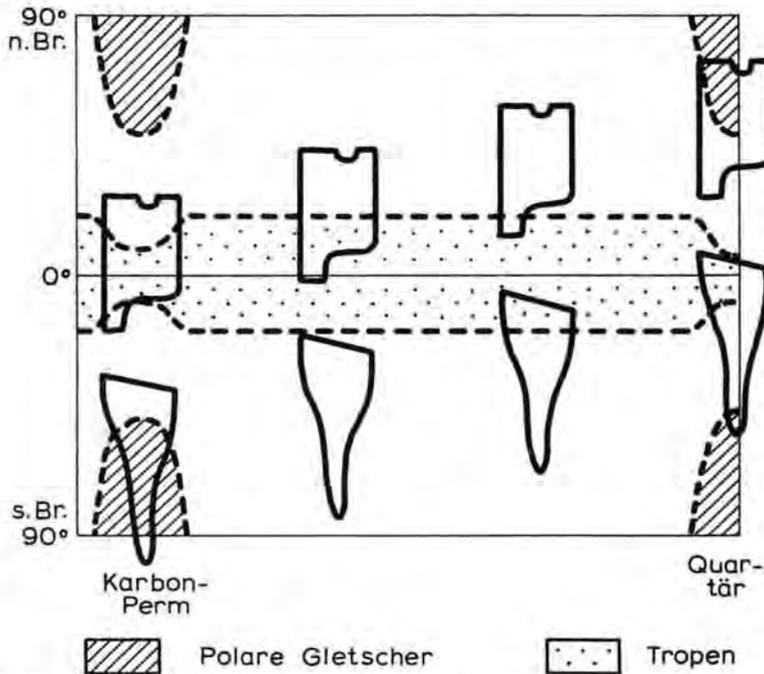


Abb. 7. Drift zweier Kontinente (z. B. Nord- und Südamerika) vom Paläozoikum bis heute und die resultierenden Klimaänderungen. Polare Gletscher nur im Karbon-Perm-Quartär. Ganz schematisch. - Continental drift of two continents (e. g. North- and South America) and the corresponding climatic changes since Paleozoic times. Polar glaciers only in Carboniferous-Permian and Quaternary times. Very schematically.

Kontinentale Drift

Seit die paläomagnetischen Methoden in weitem Umfang entwickelt und regional angewendet wurden, d. h. in den letzten 10—15 Jahren, steht auch die Kontinentaldrift-Hypothese wieder im Vordergrund des Interesses. Wegen ihrer klimatischen Konsequenzen — die wir oben schon bei der Koinzidenz-Hypothese berührten — muß sie ebenfalls zu den Eiszeithypothesen gerechnet werden. Sie ist nach wie vor umstritten; P. JORDAN nannte sie noch kürzlich temperamentvoll ein „Lieblingmärchen der Geophysiker“, während auf zwei Gondwana-Symposien, die im Herbst 1967 in Mar del Plata und Montevideo stattfanden, kontinentale Drift beinahe überhaupt nicht diskutiert, sondern als selbstverständlich vorausgesetzt wurde. Die Geologen der Südhemisphäre waren ja einer solchen Deutung immer weit aufgeschlossener als unsere — oft zu sehr durch Schulmeinungen gebundenen — Tektoniker.

Jedenfalls ist die Übereinstimmung zwischen paläomagnetisch abgeleiteten Breitenlagen und der geologisch rekonstruierten Klimageschichte zum Teil so auffällig, daß es schwer ist, in solchen Fällen nicht an kontinentale Drift zu glauben. Ein Beispiel bietet Australien (man vergleiche das Diagramm der tertiären Klima-Entwicklung Australiens und Neuseelands in SCHWARZBACH 1966). Auch die Klimageschichte Süd- und Nordamerikas läßt sich am zwanglosesten durch Drift deuten. Das ist in Abb. 7 schematisch dargestellt. Nimmt man für das Karbon-Perm und das Quartär die Existenz polarer Gletscher an, so ergibt sich damit ohne weiteres, warum Gondwana-Vereisungen nur in Süd- und nicht in Nordamerika auftreten, dagegen die quartären Vereisungen in Nordamerika viel ausgedehnter sind. (Zur Klimageschichte Südamerikas vgl. man auch die neue Zusammenstellung von W. VOLKHEIMER, 1967).

Vulkanischer Staub

Zu den eiszeitgünstigen Faktoren wird bis in die jüngste Zeit immer wieder vulkanischer Staub gerechnet, vor allem von manchen Meteorologen, und H. H. LAMB hat kürzlich sogar vermutet, daß die relativ kühlen Jahre nach 1895 in Dunedin (Neuseeland) und Punta Arenas (Süd-Chile) mit dem nicht näher bekannten Verschwinden der subantarktischen vulkanischen Thompson-Insel (54° S, 5° E) zusammenhängen; sie habe damals vielleicht einen katastrophalen Ausbruch gehabt.

Es scheint sicher, daß große Eruptionen wie die des Krakatau 1883 stellenweise und für kurze Zeit leichte Temperaturerniedrigung hervorriefen. Von größerem klimatischen Einfluß könnte das aber nur werden, wenn sich solche Ereignisse in kurzen Abständen und über lange Zeiträume hinaus wiederholten. Die geologischen Beobachtungen geben keinen Hinweis darauf, wobei übrigens der geologische Nachweis auch außerordentlich schwierig sein würde. Was wir in den alten Schichtenfolgen beobachten, sind vor allem die Lavaergüsse, und diese sind als Staub-Lieferanten unwichtig. Den (viel seltener erhaltenen) Aschen-Lagen kann man aber nicht ansehen, ob sie Einfluß auf das Wetter oder Klima nahmen. Es wäre ein großer Zufall, wenn unsere Nachfahren, sagen wir, nach 20 Mill. Jahren, die Krakatau-Eruption von 1883 in ihrem ganzen Ausmaß erkennen oder den isländischen Hekla-Aschen von 1947 anmerken würden, daß diese klimatisch ohne Bedeutung waren.

M. R. BLOCH (1964) hat darauf hingewiesen, daß vulkanische Aschen — wenn sie auf Gletscher niederfallen — deren Abschmelzung beschleunigen; er vermutete, daß dadurch quartäre Klimaschwankungen ausgelöst wurden. Aber schon die Flächen der Aschengebiete sind doch wohl bei weitem zu klein, z. B. gegenüber der Fläche des antarktischen Eises, um erdweite Wirkungen hervorzurufen.

Multilaterale Eiszeit-Entstehung

Ogleich die meisten Eiszeithypothesen irgend einen bestimmten Faktor als Hauptursache annehmen, und entsprechende Namen tragen (CO₂-Hypothese usw.), werden nicht selten zusätzliche Bedingungen herangezogen. Es sei etwa an MILANKOVITCH's Strahlungskurven erinnert, die nach Meinung KÖPPEN's, WEGENER's usw. erst dann zu Eiszeiten führten, als irgend ein zweites Ereignis zu einer allgemeinen Temperatur-Erniedrigung führte. Überhaupt erklärt ein großer Teil der Eiszeithypothesen nur Teilstücke der irdischen Klimageschichte, und keine einzige gibt eine vollgültige, abgerundete Erklärung. Das ist ein etwas unbefriedigendes Fazit.

Vielleicht liegt der Schlüssel darin, daß die großen Klimaänderungen der Erdgeschichte tatsächlich eine Reihe von Ursachen haben. Ich möchte das multilaterale Eiszeit-Entstehung nennen.

Zu dieser Auffassung kommt man besonders, wenn man einmal nicht die gewiß vorhandenen Klima-Gegensätze im Laufe der Erdgeschichte in den Vordergrund stellt, sondern die eigentlich noch auffälligere, aber meist unbeachtete Klima-Konstanz. Wir dürfen bei einer solchen Betrachtung freilich nicht von den Ländern ausgehen, in denen fast alle Eiszeit-Hypothesen entstanden sind, d. h. nicht von Europa und Nordamerika. Denn das sind Ausnahmegebiete, die „sensitiven Breiten“, wie sie Rh. FAIRBRIDGE treffend nannte, die im Pleistozän weiterhin vergletschert waren. Hier charakterisieren wirklich tiefgreifende Klimaschwankungen das Quartär, und dazu kommt, daß der Zeitraum mindestens vom mittleren Paläozoikum bis zum Alt-Tertiär viel höhere Temperaturen als heute aufwies. Beides bedeutet natürlich sehr große Temperatur-Gegensätze im Laufe der Erdgeschichte — in Deutschland ungefähr 25° Jahresmittel im Devon und 0° im Würm-Glazial —, und wir sind leicht geneigt, das für die Norm der ganzen Erde zu halten. Aber das ist nicht der Fall, und die großen Unterschiede verlieren ihr Gewicht,

wenn man mit niederen Breiten vergleicht, wo die pleistozänen Glaziale nur geringen Einfluß auf die Klimakurve hatten, und wenn man außerdem die Möglichkeit kontinentaler Drift oder sonstiger Breitenänderung für die ältere Erdgeschichte zuläßt. Lassen wir also die uns besonders vertrauten Sonderfälle beiseite und vergleichen dafür die Durchschnittstemperaturen der ganzen Erde. FLOHN und andere haben folgende Schätzungen gegeben:

heute	15,5°
quartäre Glaziale	11°
eisfreie Zeiten der Erdgeschichte	23—24°

Die Gesamtschwankung innerhalb der letzten 600 Mill. Jahre beträgt also dann nicht 25°, sondern nicht mehr als 12—13°. Dabei fallen die bei weitem größten Änderungen auf die Polargebiete. Das Gesamtklima der Erde ist demnach erstaunlich konstant geblieben, und der Paläoklimatologe sollte sich eigentlich nicht nur mit den Klimaschwankungen, sondern genau so mit dem Phänomen der Konstanz des Klimas befassen. Die relative Geringfügigkeit der Klimaschwankungen wird auch durch die Entwicklung der Tier- und Pflanzenwelt bestätigt: sie erfolgte so kontinuierlich, daß man geradezu von einem „Prinzip der biologischen Kontinuität“ gesprochen hat. Die Ursache kann nur darin liegen, daß die Hauptlebensbereiche der Organismen seit dem Präcambrium thermisch ungefähr so charakterisiert waren, wie heute auch. Niemals griffen wirklich katastrophale klimatische Ereignisse in das organische Geschehen ein. In der Jetztzeit leben fast alle Organismen bei Temperaturen, deren Juli-Mittel zwischen +5 und +35° und deren Jahresmittel zwischen —15 und +30° liegen. Diese Werte sind also offenbar in diesem langen Zeitraum nicht wesentlich über- oder unterschritten worden.

Letzten Endes muß demnach die Strahlungskraft der Sonne über Hunderte von Millionen Jahren ungefähr gleichgeblieben sein. Das schließt geringfügige Schwankungen der primären Sonnenstrahlung nicht aus, und zu diesen können nun die zahlreichen anderen Faktoren kommen, die von den einzelnen Eiszeithypothesen angegeben werden, und die dann den Klimagang im einzelnen beeinflussen: nämlich die tiefgreifenden geographischen Veränderungen in der Verteilung von Land und Meer und im Relief, also das ständig wechselnde Antlitz der Erde, Änderungen im CO₂- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, periodische Änderungen der Erdbahnelemente, Dunkelwolken im Weltraum, aber auch Kontinentaldrift und manches andere. Das Zusammenwirken aller dieser Faktoren wäre im Sinne einer multilateralen Eiszeit-Entstehung die Ursache der kleinen und großen Klimaschwankungen der Erdgeschichte.

Eine ausschlaggebende Rolle spielt sicher die initiale Bildung größerer Eismassen im polaren Bereich wegen der sekundären Abkühlungs- oder „Selbstverstärkungs“-Effekte, die automatisch damit gekoppelt sind. Wie es scheint, ist es dazu und damit zu ausgedehnten Kaltzeiten nur ganz selten gekommen. Es mag dann von den zufälligen paläogeographischen Verhältnissen abhängen, z. B. von einer „antarktischen Koinkidenz“ wie heute, wie sich ein solches Eiszeitalter im einzelnen gestaltet. Es könnte sein, daß der den Quartärgeologen so geläufige Wechsel von Glazialen und Interglazialen eine Besonderheit des Quartärs darstellt, denn bei den permo-karbonischen Gondwana-Vereisungen läßt sich etwas Entsprechendes — zum mindesten in der gleichen zeitlichen Größenordnung — bisher nicht sicher nachweisen, und noch weniger im eocambriischen Eiszeitalter. Das kann freilich auf lückenhafter Überlieferung beruhen. Beim Eocambrium kommt hinzu, daß dessen „Tillite“ teilweise nicht ganz vertrauenswürdig sind und kürzlich (W. S. OLSON 1968) sämtlich als nichtglazigene Bildungen in Zusammenhang mit der „Mondablösung“ gedeutet wurden (die freilich wohl kaum ein Geophysiker in so junge Zeit verlegen würde!).

Die hier vertretene Annahme multilateraler Eiszeit-Entstehung ist eine Erweiterung von Gedankengängen, die auch schon andere Forscher vertreten haben, ausführlich z. B. der englische Meteorologe BROOKS in „Climate through the Ages“. Doch möchte ich — anders als BROOKS und auch manche neueren Meteorologen bis hin zu H. H. LAMB — z. B. vulkanischen Staub als ganz nebensächlich betrachten, dafür jedoch vor allem zwei Faktoren als wesentlich hinzufügen: primäre Schwankungen der Sonnenstrahlung — wenn auch relativ geringen Ausmaßes (wie das auch R. F. FLINT in seiner „solar-topographic hypothesis“ tut) — und außerdem kontinentale Drift (oder jedenfalls Polverschiebungen).

Ein besonderes Kapitel bleibt zum mindesten vorläufig die quartäre Klimageschichte. Ob hier autocyklische Vorgänge beherrschend sind, bleibt zunächst unbekannt; aber man muß wohl damit rechnen und damit auch mit der Möglichkeit, daß langfristige und mittelfristige Klimaschwankungen relativ unabhängig voneinander ablaufen.

Je mehr Ursachen man annimmt, desto schwieriger wird es zu erkennen, wie etwaige langfristige Periodizitäten der Klimageschichte zu erklären sind, d. h. ob sie auf Zufall beruhen oder nicht. Manche der zahlreichen Faktoren mögen kausal miteinander verknüpft sein (z. B. der CO₂-Gehalt mit vulkanischen Vorgängen oder mit der Abtragung von Gebirgen oder der Kohlenbildung), aber darüber läßt sich wenigstens quantitativ nicht viel sagen.

Es wäre sogar denkbar, daß nicht nur manche, sondern alle Faktoren multilateraler Eiszeit-Entstehung kausal zusammenhängen, und daß sich alles oder fast alles doch auf eine einzige, übergeordnete Ursache zurückführen läßt. Die Eiszeit-Entstehung wäre dann nur scheinbar multilateral und die entsprechende Hypothese eine Art provisorischer Erklärung, die dem heutigen, unvollkommenen Stand unserer Kenntnisse entspricht. Sie würde später einmal vielleicht doch einer Eiszeithypothese Platz machen können. Ansätze in dieser Richtung gibt es z. B. bei J. STEINER; aber vorläufig sind sie noch viel zu hypothetisch, als daß man schon jetzt eine befriedigende Lösung sähe.

Neuere Literatur

(ältere Literatur in SCHWARZBACH 1961 und 1963)

- BELLAIR, P.: Réflexions sur les glaciations. *Rev. géogr. dyn.* **8**, 335-341, 1966.
- BERNARD, A. E.: Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux du Quaternaire africain. *Mém. Acad. roy. Sci. d'Outre-Mer, Cl. Sci. nat.-méd.*, n. s. **12**, 1, 1-232, Bruxelles 1962.
- BLOCH, M. R.: Die Beeinflussung der Albedo von Eisflächen durch Staub und ihre Wirkung auf Ozeanhöhe und Klima. *Geol. Rdsch.* **54**, 515-522, 1965 (s. auch *J. Glac.* (5) **38**, 240-244, 1964).
- BROECKER, W. S.: Absolute dating and the astronomical theory of glaciation. *Sci.* **151**, 299-304, 1966.
- DONN, W. L. & SHAW, D. M.: The generalized temperature curve for the past 425.000 years: a discussion. *J. Geol.* **75**, 497-503, 1967. Reply by C. EMILIANI *ibid.* 504-509.
- DORMAN, F. H.: Some Australian oxygen isotope temperatures and a theory for a 30-million-year world-temperature cycle. *J. Geol.* **76**, 297-313, 1968.
- FAIRBRIDGE, R. W.: Ice-age theory. The encyclopedia of atmospheric sciences and astrogeology (ed. R. W. FAIRBRIDGE) 462-474, New York etc. 1967.
- FLOHN, H.: Grundfragen der Paläoklimatologie im Lichte einer theoretischen Klimatologie. *Geol. Rdsch.* **54**, 504-515, 1965.
- JORDAN, P.: Die Expansion der Erde. 180 S., Braunsch. 1966 - - Über die Wolkenhülle der Venus. *Akad. Wiss. Lit. Mainz, Abh. Math.-Nat. Kl.*, 43-54, 1967.
- KREMP, G. O. W.: Antarctica, the climate of the Tertiary, and a possible cause for our Ice Age. *Intirem Res. Rep.* **2**, 1-18, Geochron. Labor., Tuscon 1964.
- KUKLA, J.: Dating Pleistocene by the balance of obtained solar heat. *Věstn. Ústř. Úst. Geol.* **43**, 215-219, 1968.

- LAMB, H. H.: The problem of "Thompson Island": volcanic eruptions and meteorological evidence. *Brit. Antarct. Surv. Bull.* **13**, 85-88, 1967.
- LLIBOUTRY, L.: *Traité de glaciologie*, II, 429-1040, Paris 1965.
- MITCHELL, J. M.: Theoretical paleoclimatology. *The Quaternary of the United States* (ed. H. E. WRIGHT & D. G. FREY), 881-901, Princeton 1965.
- ÓFIK, E. J.: Climatic change in cosmic perspective. *Icarus* **4**, 289-307, 1965.
- OLSON, W. S.: Origin of the Cambrian-Precambrian unconformity. *Amer. Scient.* **54**, 458-464, 1966.
- SCHWARZBACH, M.: *Das Klima der Vorzeit*. 2. Aufl., 275 S., Stuttgart 1961. - - *Climates of the Past*. 328 S., London etc. 1963. - - Paläoklimatologische Eindrücke aus Australien. *Geol. Rdsch.* **54**, 128-160, 1965. - - Paläoklimatologische Eindrücke aus Neuseeland. *Eiszeitalt. u. Gegenw.* **16**, 226-238, 1965.
- SELLERS, W. D.: *Physical climatology*. 272 S. Chicago u. London 1965.
- STEINER, J.: The sequence of geological events and the dynamics of the milky way galaxy. *J. Geol. Soc. Austral.* **14**, 99-131, 1967.
- TANNER, W. F.: Cause and development of an ice age. *J. Geol.* **73**, 413-430, 1967.
- VOLKHEIMER, W.: Palaeoclimatic evolution in Argentina and relations with other regions of Gondwana. *Simposio internac. estratigr. paleont. Gondwana, La Plata, Okt. 1967*.
- WILSON, A. T.: Origin of ice-ages: an ice shelf theory for pleistocene glaciation. *Nature* **201**, 147-149, 1964.
- WOLDSTEDT, P.: Die interglazialen marinen Strände und der Aufbau des antarktischen Inland-eises. *Eiszeitalt. u. Gegenw.* **16**, 31-36, 1965.

Manusk. eingeg. 11. 10. 1968.

Anschrift des Verf.: Prof. Dr. M. Schwarzbach, Geol. Institut der Universität, 5 Köln, Zulpicher Straße 49.