Die Eiszeiten im Ablauf der Erdgeschichte

Nach einem am 4. Juli 1944 gehaltenen öffentlichen Vortrag der
Universität Freiburg i. Br.

von

W. Soergel †

Unter den Klimazeugen, die uns aus früheren Erdzeitaltern überliefert sind, nehmen die Spuren von Vergletscherungen eine erste Stelle ein, weil sie für die Gebiete ihres Vorkommens und, sind diese sehr ausgedehnt, auch für ein weiteres Umland das Klima, insonderheit die Temperaturverhältnisse eindeutig charakterisieren; weil sie schon aus Zeiten erhalten sind, in denen Landpflanzen noch nicht existierten, aus denen wir vom Leben überhaupt nur so geringe Kenntnis haben, daß eine Beurteilung der einstmaligen klimatischen Verhältnisse auf biologischer Grundlage unmöglich ist; weil sie schließlich für Grundfragen der Erdgeschichte eine außerordentliche Bedeutung besitzen.

Derartige Spuren sind teils aus gleichen, teils aus verschiedenen Zeiten auf allen Kontinenten gefunden worden. Die folgende Tabelle unterrichtet über die zeitliche Verteilung und über die geographische Lage der einzelnen Vorkommen. Einige dieser alten Vereisungen liegen Hunderte von Jahrillionen vor der Gegenwart.

I.

Wie kann, wird man fragen, für so ferne Zeiten das einstmalige Vorhandensein von Gletschern oder weitgehenden Eisdecken erwiesen werden?

Entscheidend sind Gesteine jener Zeiten, deren Bildungsbedingungen im Vergleich mit Gesteinsbildungen der Gegenwart und der jüngsten Vergangenheit vollständig geklärt werden können.

Die Erdzeit- alter (Dauer in Jahr- millionen)	Die geologischen Formationen (Zeit- stellung in Jahr- millionen vor heute)	Die jeweils vereist gewesenen Gebiete (Ein beigesetztes Fragezeichen bedeutet, daß die geologischen Zeugnisse oder die Altersstellung zweifelhaft sind)
Neozoikum (60)	Quartär (0,8 — 0,0) Tertiär (60 — 0,8) Kreide (140 — 60) Jura (175 — 140) Trias (200 — 175) Perm (240 — 200) Karbon (310 — 240) Devon (350 — 310) Silur (450 — 350) Cambrium (540 — 450)	Nordhalbkugel: Diluviale Eisdecken in Nordamerika, Grönland, Europa, Asien, zahlreiche Gebirgsvergletscherungen. Südhalbkugel: Diluviale Eisdecken in der Antarktis, in Patagonien. Gebirgsvergletscherungen in Südamerika, Australien, Neusee- land, am Kilimandjaro. Nordhalbkugel: Alaska (Miozän); Britisch Columbia, Colorado, Idaho (?), (Eozän?). Südhalbkugel: — — — Nordhalbkugel: — — — Südhalbkugel: Zentrales Australien (mittlere oder obere Kreide) ? Nordhalbkugel: Sierra Nevada in Kalifornien. Südhalbkugel: — — — Nordhalbkugel: — — — Südhalbkugel: Äquatorialafrika (Rhät ?) Nordhalbkugel: Am Karafuß nördlich des Ural, Oklahoma (Nordamerika), Squantumhalbinsel bei Boston (Nordamerika) ? Eisdecken in Vorderindien. Südhalbkugel: Eisdecken in Brasilien, Uruguay, Bolivien, Argentinien, Falk- landinseln, Südafrika, Madagaskar, Australien, Tasmanien. Nordhalbkugel: — — — Südhalbkugel: Südafrika. Nordhalbkugel: Nordural, Nowoja Semlja; Alaska (?) Südhalbkugel: — — — Nordhalbkugel: — — — Südhalbkugel: — — — Nordhalbkugel: Ostgrönland, nördliches Skandinavien, südliches Sibirien, Hima- laja, Jangsetal in China, Vorderindien, Kuruk-Tagh (Sinkiang, China). Urah (Nordamerika) ? Südhalbkugel: Südastralien, Südwest- und Mittelafrika (Angola, Kongo). Nordhalbkugel: Ontario, Nordamerika (Kobalt-Tillit, unteralgonkisch). Südhalbkugel: Südafrika (Chuos-Tillit, vielleicht frühhalgonkisch). Nordhalbkugel: — — — Südhalbkugel: Südafrika (Chuos-Tillit, vielleicht jungarchaisch).
Mesozoikum (140)		
Palaeozoikum (340)		
Eozoikum (460)	Eocambrium (600 — 540) Algonkium, (1000 — 600)	
Archaeozoikum (über 700?)		

Wo sich auf dem Lande Eismassen in Bewegung befinden, wird am Grunde Gesteinsschutt hingeschoben, der im Entstehungsbereich der Eismassen oder auf dem Abflußwege aufgenommen wurde. Dabei werden die über den Felsboden hinbewegten Gesteinsstücke angeschliffen und die Schliifflächen, soweit der liegende Fels härtere Partien führt, geschrammt und gekritz. Das bei diesem Schleifprozeß anfallende Abreibsel bildet einen tonig-sandigen, von Schmelzwasser durchtränkten Brei, in dem die geschliffenen und gekritzten Geschiebe ohne Sonderung nach ihrer Größe und ohne eine schichtige Lagerung eingebettet sind. Das ist die Grundmoräne; ihre Ausdehnung deckt sich mit der der Eismasse. Nach Abschmelzen des Eises liegt sie als ein Lockergestein — wir nennen es Geschiebemergel — zu Tage.

Unter der Grundmoräne bzw. dem Geschiebemergel ist der Felsboden durch die über ihn hinbewegten Gesteinsstücke abgeschliffen und wie diese Gesteinsstücke selbst geschrammt und gekritz.

Geschiebemergel über geschliffenem Fels, das ist ein untrügliches Zeugnis für einstmaliges Vorhandensein von gleitenden Eismassen.

Wurden über einem Geschiebemergel in der Folgezeit mächtige weitere Gesteinsmassen abgelagert, so erfuhr er eine Zusammenpressung und wurde in seiner ursprünglich weichen Grundmasse zu einem felsharten Gestein verfestigt, er bewahrte aber seinen Charakter als ein in der Hauptmasse meist feinkörniges, im wesentlichen nicht geschichtetes und geschliffene und gekritzte Geschiebe führendes Gestein. Wir nennen es zum Unterschied von dem weichen Geschiebemergel der jüngsten geologischen Vergangenheit Tillit. Seinen glazigenen Charakter bestätigt an vielen Stellen der geschliffene und geschrammte Felsboden, auf dem er aufruht.

Die Bilder zeigen, daß aus weit zurückliegenden Zeiten gekritzte Geschiebe, Tillit und geschliffener Felsboden so erhalten sind, daß die genetische Deutung keinerlei Bedenken begegnet. Hier haben wir sichere Zeugen für alte Vereisungen. Ihre einstmalige Ausdehnung läßt sich freilich nur für einige Perioden einigermaßen beurteilen. Für fast alle aber gilt, daß es sich nicht um Gebirgsvergletscherungen von der Art handelt, wie sie gegenwärtig in

zahlreichen Hochgebirgen der Erde bestehen. Mögen derartige Vergletscherungen im Ablauf der Erdgeschichte wiederholt und auf verschiedenen Breiten eingetreten sein, geologische Zeugnisse von ihnen können wir kaum erwarten. Denn diese werden mit den einst vergletscherten Hochregionen der Gebirge der Abtragung, die jeder großen Gebirgsbildung folgte, anheim gefallen sein. Wo wir in den Gesteinen älterer Erdperioden die Spuren von Vereisungen antreffen, dort läßt die Art ihres Vorkommens und ihre Verbreitung kaum je einen Zweifel darüber, daß diese Spuren nicht in alten, stark zertalten Bergländern, sondern daß sie in Gebieten geringerer Höhenlage und geringerer Oberflächengliederung hinterlassen worden sind. Hier können Eismassen bei geminderten Temperaturen bestanden, hier können sie sich aber, soweit gemäßigte Breiten in Frage kommen, nicht entwickelt haben. Sie werden von Hochländern, zum Teil von Gebirgen ihren Ausgang genommen haben, von hier verfrachtet sie Gesteinsschutt in das tiefere Vorland. Wo diese Nähr- und Abtragungsgebiete der alten Eismassen jeweils lagen, hat sich nicht immer genauer feststellen, oft nur mutmaßen lassen. Einen guten Teil der einstmals vereisten Gebiete kennen wir also nicht. Wir kennen, bezeugt durch die Vereisungsspuren, nur die Gebiete der glazialen Ablagerung und auch diese nur insoweit, als die entsprechenden Gesteine erhalten blieben und der Beobachtung zugänglich bzw. beobachtet wurden. Auch die Bereiche glazialer Ablagerung kennen wir keineswegs in ihrem vollen Umfang. Es sind also die Vereisungen früherer Erdperioden ausgedehnter, ja, zum Teil wesentlich ausgedehnter gewesen, als sich bisher nach den geologischen Befunden hat feststellen lassen.

II.

Gleichwohl kann nur für wenige Perioden von wirklichen Eiszeiten, also von Zeiten gesprochen werden, in denen Eisdecken auf verschiedenen Kontinenten bestanden, in denen sie wesentlich ausgedehnter als gegenwärtig und nicht nur auf höhere Breiten beschränkt waren, und in denen die abkühlende Wirkung dieser Eisdecken zu einer maßgeblichen regionalen Temperatursenkung auf der ganzen Erde führte. Nicht wenige der vorquartären Vereisungen

waren, selbst bei größerer räumlicher Entfaltung, doch mehr örtliche, soweit wir heute wissen, auf einen Kontinent beschränkte Erscheinungen. Darauf deuten auch Charakter und Verbreitung der Faunen und Floren der betreffenden Perioden. Zu den Vereisungen dieser Art gehören die devonische in Südafrika und die mesozoischen und tertiären, die überdies zum Teil umstritten sind.

Eine sehr geringe Ausdehnung scheinen, wenigstens außerhalb der polaren Zonen, Vereisungen im Cambrium und im Silur besessen zu haben.

Offen ist die Frage noch für die archäozoische Zeit. Hier ist mit der Erhaltungsmöglichkeit glazialer Spuren in einem bescheidenen Maße zu rechnen, da die Gesteine dieses Erdzeitalters gemeinhin sehr starke Veränderungen erlitten haben. Möglich ist — von nicht ganz sicheren Zeugnissen in Nordamerika sehen wir ab —, daß der älteste bekannte Tillit, der Chuos-Tillit im Damarasystem Südwestafrikas, noch jungarchäozoisch ist. Er ist jedenfalls nicht jünger als das frühe Algonkium,

Es folgt, bezeugt durch den sogenannten Kobalt-Tillit in Ontario, eine größere Vereisung im unteren Algonkium (Huron) von Nordamerika. Das Eis überdeckte eine Fläche von mindestens einer halben Million qkm; unter Einrechnung vom Hauptgebiet weit entfernt, wohl gleichaltriger Tillitvorkommen würde das vereiste Gebiet an Ausdehnung dem heutigen antarktischen kaum nachgestanden haben. Aber das Vorhandensein selbst einer recht weiträumigen Eisdecke gestattet, zumal völlig gleichaltrige Vereisungen auf anderen Kontinenten nicht bekannt sind, nur ganz allgemeine Schlüsse auf den Klimacharakter dieser Zeit. Denn wir wissen nicht, ob die Kontinente damals die gleiche geographische Lage besessen haben wie heute, ob also der Kobalt-Tillit auf der geographischen Länge und Breite entstanden ist, auf der wir ihn heute finden. Es ist aus Gründen, die wir später kennen lernen werden, mit der Möglichkeit zu rechnen, daß das Verbreitungsgebiet des Tillits zur Zeit der Vereisung wesentlich polnäher lag als heute. Eine starke, Vereisungen ermöglichende Abkühlung könnte auf die Polargebiete beschränkt gewesen sein. Trotzdem ist dieser und der älteren Chuos-Vereisung eine hohe erdgeschichtliche Bedeutung nicht abzuspochen.

Beide beweisen, daß die einst weitverbreitete Auffassung nicht gelten kann, es habe die Entwicklung des Erdklimas von den älteren zu den jüngeren Zeiten einer allmählich fortschreitenden Abkühlung entsprochen. Der physikalische Rahmen für die Erdklimata ist vielmehr vor Hunderten von Jahrmillionen schon der gleiche gewesen wie heute. Die innere Eigenwärme der Erde ist auf den Wärmehaushalt der Erdoberfläche und damit auf das Klima ohne Einfluß gewesen; bestimmend waren exogene, von außen einwirkende Faktoren, und unter diesen in erster Linie die solare Wärmestrahlung. Sie muß nach den Vorstellungen, die man über den Entwicklungsgang der Sonne gewonnen hat, vor Zeiten stärker gewesen sein als heute. Diese Auffassung findet freilich in einer Entwicklung des Erdklimas über die letzten 800 Millionen Jahre keine direkte Bestätigung und kann, bei der Möglichkeit früher anderer Längen- und Breitenlage der Kontinente, sie wohl beim Einspielen weiterer klimabestimmender Faktoren kaum finden. Wenn aber in dieser Zeit die Ausstrahlung der Sonne stärker war als heute, so muß beim Einsetzen der ältesten Vereisungen, auch wenn sie auf polnähere Gebiete beschränkt geblieben sein sollten, ein Faktor oder ein Faktorenkomplex die der Erde oder doch Teile der Erdoberfläche zugestrahlte Wärme, mindestens jahreszeitlich, beträchtlich gemindert haben.

Eine zeitweilig stark verringerte Wärmeeinnahme der Erde bzw. größerer Teilgebiete der Erdoberfläche beweisen vor allem die weitverbreiteten Vereisungsspuren des jüngeren Eozoikum, des sog. Eocambrium (etwa 600 bis 540 Millionen Jahre vor heute). Tillite dieser Zeit finden sich in verschiedenen Gebieten der Nord- und der Südhalbkugel. Auf der Nordhalbkugel kennen wir sie in Ostgrönland, im nördlichen Skandinavien, im südlichen Sibirien (Kusnezker Alatau), im Himalaja, im Jangtsetal in China und in Vorderindien. Möglicherweise gehören Vereisungsspuren in Utah und in andern Gebieten Nordamerikas ebenfalls in diese Zeit. Auf der Südhalbkugel sind ein Teil Australiens und verschiedene Gebiete Südwest- und Mittelafrikas (Angola, Kongo) vereist gewesen. Es läßt sich nicht beweisen, daß alle diese Gebiete zur gleichen Zeit unter einer Eisdecke lagen; es ist nicht bewiesen, ja sehr unwahr-

scheinlich, daß die damalige Lage der Kontinente nach geographischer Länge und Breite der gegenwärtigen entsprach. Wäre beides der Fall gewesen, so hätte im Eocambrium eine Kälteperiode bestanden, die an Härte und an regionaler Auswirkung die quartäre bei weitem übertraf. Als wahrscheinlich darf gelten, daß einige dieser Tillite gleichaltrig sind, und daß diese gleichzeitig vereisten Gebiete nicht alle in polaren Zonen lagen. Mit einer starken Abkühlung, mit wirklich eiszeitlichen Verhältnissen kann deshalb gerechnet werden. Die erdgeschichtliche Bedeutung der eocambrischen Vereisungen wird sich aber erst völlig beurteilen lassen, wenn ihr spezielles Alter innerhalb des Eocambrium in den verschiedenen Gebieten genauer festgelegt ist, wenn wir über die einstmalige Lage der Kontinente näher unterrichtet sind, und wenn wir die Faktoren kennen, die für das Entstehen dieser Vereisungen, ja, ausgedehnter Vereisungen überhaupt, entscheidend sind.

III.

Auf die beiden letzten Fragen werden uns jüngere Vereisungen eine, wenn auch noch nicht erschöpfende Antwort geben. Sie ist nicht zu erwarten von den Vereisungen, die für das mittlere Obersilur im Nordural und auf Nowoja Semlja und für das Obersilur in Alaska angegeben werden, ebensowenig von der offenbar wenig ausgedehnten Vereisung im Unterdevon Südafrikas. Für diese ist aber im Hinblick auf unsere zweite Frage beachtenswert, daß ihre Eismassen im Gebiete von geringer Meereshöhe vorstoßen konnten, die Vereisung selbst deshalb mit einer beträchtlichen Abkühlung verbunden gewesen sein muß. Eine derartige Temperaturminderung zur Zeit des Unterdevon ist für ein Südafrika von der gegenwärtigen geographischen Lage um so weniger verständlich, als sich sonst auf der Erde unterdevonische, überhaupt devonische Vereisungsspuren, wengleich sie von verschiedenen Stellen der Nordhalbkugel gemeldet worden sind, nicht haben mit Sicherheit nachweisen lassen. Es liegt der Gedanke nahe, daß Südafrika damals vom Südpol weniger weit als heute entfernt war, also mit Verschiebungen der Kontinente oder mit absoluten Verlagerungen der Pole (siehe S. 135) oder schließlich mit beiden im Ablauf der Erdgeschichte zu rechnen ist.

Zu einem endgültigen Urteil in dieser Frage führen uns die ausgedehnten Vereisungen, die im Carbon und Perm, in der Zeit zwischen etwa 280 und 220 Millionen Jahren vor heute, vor allem die Kontinente der Südhalbkugel betroffen haben. Tillite dieses Alters haben eine weite Verbreitung in Südamerika (Brasilien, Uruguay, Bolivien, Argentinien, Falklandinseln), Südafrika und Madagaskar, Vorderindien und Australien mit Tasmanien. Die damals vereisten Gebiete liegen auf der Südhalbkugel und auf der Nordhalbkugel (Vorderindien) etwa zwischen dem 18. und dem 40. Breitengrad, in weitem Abstand von den gegenwärtigen Polarzonen.

Gemeinsam sind den räumlich weit getrennten Vereisungsgebieten einige wesentliche Züge im Ablauf des geologischen Geschehens.

1. In jedem Gebiet haben im Zeitbereich Carbon—Perm mehrere Vereisungen stattgefunden; in Australien und Südamerika sind es fünf, in Südafrika und Vorderindien sind wenigstens zwei nachgewiesen. Zwischen den verschiedenen, die einzelnen Vereisungen bezeugenden Tilliten liegen Gesteinsfolgen, die verschiedentlich Pflanzenreste führen und zum Teil ziemlich mächtige Kohlenflöze enthalten. Es muß das Klima zwischen den Eiszeiten also über längere Zeit für die Pflanzenwelt recht günstig gewesen sein.

2. In jedem Gebiet erreichten die Eismassen wenigstens einer Vereisung das Meer, in das große Treibeisschollen ihre Gesteinsfracht abladen. Diese Tiefenlage der Eisdecken bzw. ihrer randlichen Teile auf vier Kontinenten erweist eine regionale, wahrhaft eiszeitliche Temperaturminderung.

3. Überall folgt über dem Tillit einer Vereisung ein Sandstein, der Blattabdrücke der wohl den Farnen zuzuzählenden *Glossopteris* führt. In Südafrika, Vorderindien und Australien enthalten die Meeresablagerungen, denen gekritzte Geschiebe dieser Vereisung zugemischt sind, eine *Eurydesma* genannte Muschel. Das Alter dieser Vereisung konnte als unterpermisch bestimmt werden.

Die weite Verbreitung der *Eurydesma*-schichten, insbesondere das Vorkommen der *Glossopteris*-flora in räumlich weit getrennten Gebieten ist sehr beachtenswert. Es erhebt sich die Frage, wie kann

über die ausgedehnten marinen Räume zwischen den Südkontinenten die Glossopterisflora eine solche Verbreitung gewonnen haben? Waren verbindende Landmassen vorhanden oder haben die Kontinente damals eine andere Lage besessen als heute?

4. In jedem der vereist gewesenen Gebiete ist der unterpermischen eine oberkarbonische Vereisung vorausgegangen. Noch ältere Tillite in Australien und auch in Südamerika sind als mittelkarbonisch, ein ältester vielleicht als unterkarbonisch anzusprechen.

5. Gemeinsam ist schließlich den jungpaläozoischen Vereisungen der Südkontinente und Vorderindiens eine sehr bedeutende Ausdehnung. Es handelt sich um Inlandeisdecken. Nach neueren Schätzungen (SALOMON-CALVI) überdeckten sie in Südamerika ein Gebiet von mindestens 4 Millionen qkm, in Südafrika von mindestens 2,5 Millionen, in Vorderindien von etwa 3 Millionen und in Australien — heute vom Meere bedeckte Gebiete eingerechnet — von wenigstens 4 bis 5 Millionen qkm (gegenüber rund 2 Millionen qkm der gegenwärtigen grönländischen Eiskappe). Zuzurechnen sind wie für Australien so auch für die anderen Kontinente Gebiete, die heute unter dem Meeresspiegel liegen, damals landfest und vom Eise überfahren waren. Mit den marinen Räumen, über denen die vom Lande her genährte Eisdecke mehr oder weniger geschlossen war, haben die vereisten Gebiete auf der Südhalbkugel (und in Vorderindien) eine Ausdehnung von mehr als 20 Millionen qkm besessen.

Von ähnlichem Ausmaß waren die Inlandeisdecken der quartären Eiszeit auf der Nordhalbkugel. Aber ihr Äquatorabstand war wesentlich größer. Zur Zeit seiner größten Ausdehnung reichte das quartäre europäische Inlandeis bis zum 49., das nordamerikanische bis fast zum 37. Breitengrad. Die jungpaläozoischen Tillite nähern sich dem Äquator in Südafrika bis auf 22, in Südamerika und Australien bis auf 18 und in Vorderindien bis auf 16 Breitengrade. Danach muß, wenn die geographische Lage der Südkontinente damals die gleiche war wie heute, die kalte Zone auf der Südhalbkugel eine außerordentliche Ausdehnung — vom Pol bis in die gegenwärtige heiße Zone — besessen haben, und es muß die Temperaturminderung, die diesen

Zustand heraufführte, wesentlich stärker gewesen sein als die quartäre. Da sich auf der Nordhalbkugel die kalte Zone in der gleichen Zeit ebenfalls sehr weit gegen den Äquator erstreckt haben muß — örtliche geographische Bedingungen bestimmten Art und Ausmaß der besonderen Auswirkungen — so muß in dieser Zeit

1. der Lebensraum für Tiere und Pflanzen des Landes, insbesondere für klimatisch anspruchsvollere, sehr beschränkt und es müssen die Lebensbedingungen in Teilen dieses Raumes ungünstig gewesen sein; es müssen

2. ausgedehnte Eismassen weite Gebiete der Nordhalbkugel bedeckt haben.

Beides ist nicht der Fall gewesen. Im Carbon und im unteren Perm lebte in der gegenwärtigen gemäßigten Zone der Nordhalbkugel eine klimatisch keineswegs anspruchslose Flora unter den günstigsten Bedingungen. Und Vereisungen von der Ausdehnung und der Breitenlage, wie sie als Analoga zu den Eisdecken der Südhalbkugel zu erwarten wären, haben — von Vorderindien abgesehen — nicht bestanden. Daraus folgt, daß auf der Südhalbkugel die kalte Zone nicht so weit gegen das äquatoriale Gebiet gereicht haben kann, wie es die Verbreitung der Tillite nahelegt, daß die Inlandvereisungen der Südkontinente also nicht in der Breitenlage bestanden haben können, in der wir ihre Zeugnisse heute finden, daß die Südkontinente also zur Zeit der jungpaläozoischen Vereisungen ihre gegenwärtige geographische Lage nicht besessen haben können.

An zahlreichen Stellen hat man zwar auch auf der Nordhalbkugel, besonders in Nordamerika, geglaubt, glazigene Gesteine jungpaläozoischen Alters entdeckt zu haben. Aber diese nordamerikanischen Vorkommen sind fast ausnahmslos, soweit nicht überhaupt mit anderen Deutungen zu rechnen ist, nach Entstehung oder nach Alter nicht hinreichend geklärt und können deshalb nicht als sichere Zeugen gelten. Selbst wenn man überall dort, wo eine glazigene Entstehung jungpaläozoischer Gesteine nach den in der Literatur gegebenen Darstellungen möglich erscheint, mit jungpaläozoischen Vereisungen rechnen wollte, so würden die damals vereist gewesenen Gebiete in einem nicht verständlichen Gegensatz zu den Verhält-

nissen auf der Südhalbkugel mit nur einer Ausnahme auf höhere Breiten beschränkt gewesen sein. Die Ausnahme betrifft Vereisungsspuren in den Arbuckle — und in den Wichitabergen in Oklahoma auf 35° n.Br. Da es sich hier aber um eine mittelcarbonische Gebirgsvergletscherung handeln soll, so kann von einer Analogie zu den zwischen 18° und 40° s.Br. entwickelten Inlandeisdecken der Südhalbkugel nicht gesprochen werden.

Und dasselbe gilt für Eurasien. Die ausgedehnten jungpaläozoischen Vereisungen in Vorderindien würden, lägen ihre Tillite heute auf der gleichen Breite, auf der sie entstanden sind, in der gleichen Zeit Vereisungen in anderen Gebieten ähnlicher Breitenlage und auf nördlicheren Breiten erwarten lassen. Sichere Zeugnisse dafür haben sich nirgends gefunden. Solange für die von Norin im Kuruk-Tagh (Sinkiang, China) auf 41° n.Br. entdeckten Tillite mit der Möglichkeit eines jungalgonkischen oder eocambrischen Alters zu rechnen ist, kann nur ein wahrscheinlich als Tillit zu deutendes Gestein am Karafuß vor dem Nordural auf 69° n.Br. genannt werden, dessen unterpermisches Alter sicher steht.

So sind — immer unter der Voraussetzung, daß die geographische Lage der Südkontinente im Permo-Carbon die gleiche war wie heute — in einer Zeit, da auf der Südhalbkugel Inlandeismassen bis in die gegenwärtige heiße Zone sich erstreckten, auf der Nordhalbkugel, außer in Vorderindien, nur beschränkte Gebiete auf höheren Breiten vereist gewesen. Es fehlt völlig die bei unveränderter Breitenlage der Kontinente zu erwartende prinzipielle Analogie. Dafür kann eine Erklärung nicht darin gefunden werden, daß damals die Kontinente der Nordhalbkugel vom Meere weit überflutet, also keine größere Vereisungen ermöglichenden Festländer vorhanden gewesen wären. Weite Teile von Asien, Nordeuropa, ausgedehnte Gebiete von Mittel- und Westeuropa und der größte Teil von Nordamerika sind landfest gewesen. Allerdings sind in Zeiten sinkender Temperaturen und damit sinkender Schneegrenzen Vergletscherungen nicht nur abhängig vom Vorhandensein und von der Ausdehnung der Landmassen. Es spielen, abgesehen von der geographischen Breite, die Lage zum Meer, die Höhenlage und die Höhengliederung des Landes und die Niederschlagsmenge

eine sehr wesentliche Rolle. Aber diese Faktoren verlieren mit fortschreitender Temperatursenkung an Bedeutung. Bei einer Temperaturminderung, die auf der Südhalbkugel zwischen 18° und 40° s.Br. Inlandvereisungen sich entwickeln oder ausbreiten ließ, muß die Schneegrenze auch auf der Nordhalbkugel so weit herabgedrückt worden sein, daß selbst in weniger hohen und schwach gegliederten Landgebieten die Bedingungen für Vereisungen gegeben waren. Überdies waren große, wenn auch nicht zu alpinen Höhen aufragende Gebirge vorhanden, die unter der Temperaturminderung dieser Zeit die Möglichkeit zur Entwicklung ausgedehnter Vereisungen boten. Aber nicht einmal ein kühles Klima läßt sich, von wenigen örtlichen und für nur kurze Zeitabschnitte verbindlichen Beobachtungen abgesehen, wahrscheinlich machen. Im Oberkarbon und im unteren Perm bestand auf den Nordkontinenten im Bereich der heutigen gemäßigten Zone ein feucht-warmes, dem tropischen verwandtes Klima. Periodische Abkühlungen bedeutenderen Ausmaßes haben sich an geologischen und biologischen Befunden nicht feststellen lassen. Die klimatischen Verhältnisse der Nordhalbkugel haben also in keiner Weise denen entsprochen, die beim Vorhandensein sehr ausgedehnter Vereisungen zwischen 18° und 40° s.Br. unbedingt zu erwarten wären. Daraus folgt, daß derartige Vereisungen in dieser Breitenlage auf der Südhalbkugel nicht bestanden haben können, daß also die damals vereisten Gebiete der Südhalbkugel (und Vorderindiens) sich während der Vereisungen nicht in der Breitenlage befunden haben können, in der heute die geologischen Zeugnisse für diese Vereisungen liegen. Diese Gebiete und damit die betreffenden Kontinente müssen damals auf höheren Breiten, also näher dem Südpole und damit gleichzeitig auch näher beieinander gelegen haben.

Diese Auffassung bleibt auch dann gültig, wenn sich auf höheren Breiten der Nordhalbkugel größere Vereisungen jungpaläozoischen Alters sollten noch nachweisen lassen. Sie ist seit Jahrzehnten, wenn auch nicht allgemein, schon vertreten worden deshalb, weil die permo-carbonischen Vereisungen der Südkontinente bei der heutigen geographischen Situation sowohl in dem Abstand vom Südpol

als in den weiten Abständen untereinander unverständlich und im Rahmen gesicherter Erkenntnisse und Erfahrungen ganz unerklärlich sind.

Für eine einstmals andere geographische Lage der Vereisungsgebiete sind drei Erklärungsmöglichkeiten in Betracht zu ziehen:

1. Es könnte an eine von der heutigen abweichende Lage des Südpols bei Festliegen der Kontinente, also an Änderungen in der Lage der Drehachse der Erde, gedacht werden. Dabei würde mit Polwanderungen über die Oberfläche der Erde im Ablauf der Erdgeschichte zu rechnen sein. Aber es ist nicht möglich, für den Südpol zwischen den vereist gewesenen Gebieten (Südamerika, Südafrika, Vorderindien, Australien) eine Lage zu finden, von der diese Gebiete alle einen auch nur ähnlichen Abstand haben, eine Lage, die alle diese Vereisungen aus einer größeren Polnähe der vereisten Gebiete verständlich machen könnte; und es würde der Nordpol, der ja entsprechend verlagert gewesen sein müßte, in keinem Fall in eine solche Stellung kommen, daß die klimatischen Verhältnisse der Nordhalbkugel, wie sie für die Zeit des Carbon und des unteren Perm aus geologischen und biologischen Befunden abgeleitet werden konnten, sich mit der Pollage in Einklang befänden. Überdies ist es aus anderen Gründen sehr unwahrscheinlich, daß jemals derartige, d. h. durch Änderungen in der Lage der Drehachse der Erde bedingte, Polverlagerungen um mehr als einige Breitengrade stattgefunden haben. Und so geringe Abweichungen vom gegenwärtigen Zustand würden für eine Erklärung der jungpaläozoischen Vereisungen der Südkontinente überhaupt ohne Bedeutung sein.

2. Als zweite Möglichkeit ist eine Änderung der Pollage durch Verschiebung der „Erdkruste“ über ihrer Unterlage, also bei Festliegen der Drehachse der Erde, in Betracht zu ziehen; MILANKOWITCH hat gezeigt, daß Polwanderungen dieser Art im Ablauf der Erdgeschichte eingetreten sind. Aber sie allein können aus den schon unter 1. genannten Gründen die permokarbonischen Vereisungen der Südkontinente nicht erklären.

3. So bleibt die dritte Möglichkeit, daß bei gleicher oder nahezu gleicher absoluter Lage der Drehachse der Erde die Pollage auf der Erdoberfläche nicht nur durch Verschiebung der „Erdkruste“ im

ganzen über ihrer Unterlage, sondern auch durch gesonderte Verschiebungen von Kontinentalschollen Veränderungen erfahren hat. Die Südkontinente haben dementsprechend in früheren Zeiten eine andere Längen- und Breitenlage besessen, sie sind im Laufe langer Zeiträume in die gegenwärtige Lage verschoben worden.

Diese, in der Hauptsache von A. WEGENER entwickelte, heute noch nicht allseitig anerkannte Verschiebungstheorie begegnet hinsichtlich der Verschiebungsmöglichkeiten von seiten der Geophysik keinen ernstlichen, vor allem keinen entscheidenden Bedenken.

Im Einklang mit der bekannten stofflichen Gliederung der Erde in spezifisch schwerere Massen näher und spezifisch leichtere Massen ferner dem Erdmittelpunkt ist man zu der Vorstellung gekommen, daß die Erde aus Kugelschalen verschiedener Dichte sich aufbaut. Schwermessungen haben ergeben, daß die äußerste, spezifisch leichteste dieser Kugelschalen (Sial) die nächst tiefere, schwerere (Sima) nicht mehr geschlossen überdeckt, daß im Gebiet der großen Ozeane schwerere Massen der Oberfläche näher liegen, ja in ausgedehnten Gebieten des Pazifischen Ozeans an den Meeresboden heranreichen. Die oberste Schale erscheint in größere Fetzen zerrissen, sie ist in Teilstücken, den Kontinenten, gewissermaßen zusammengeschoben. Das bedeutet, daß die Kontinente der nächst tieferen und schwereren Schale nicht einfach aufruhem — das könnte nur eine völlig geschlossene oberste Kugelschale —, daß sie vielmehr in sie eingesunken, den spezifischen Gewichtsverhältnissen entsprechend eingetaucht sind, und damit etwa wie Eisberge im Wasser in ihr schwimmen. Besitzt die tragende schwerere Masse in der Eintauchtiefe der Kontinente eine nicht zu hohe Zähigkeit, was zwar nicht bewiesen, aber in Anbetracht der schon für diese Tiefe anzunehmenden höheren Temperaturen nicht unwahrscheinlich ist, so kann für die schwimmenden Kontinente die Möglichkeit horizontaler Bewegungen nicht bezweifelt werden. Als verfrachtende Kräfte können Strömungen in der Simazone, dann eine Polfluchtkraft und eine Ostfluchtkraft in Frage kommen, deren Vorhandensein erweisbar ist. Welche dieser Kräfte vorherrschend wirksam waren, oder wie sich in verschiedenen Zeiten und auf verschiedenen Breiten die Wirkungen derartiger Kräfte kombinierten, das läßt sich noch nicht

beurteilen. Die geophysikalischen Grundlagen für die Theorie der Kontinentalverschiebungen sind noch nicht völlig gesichert. Aber es sind aus dem Bereich der Geophysik keine Tatsachen bekannt, die Kontinentalverschiebungen ausschließen würden. Und da geodätische Messungen im grönländischen Gebiet wenn auch nicht bewiesen, so doch wahrscheinlich gemacht haben, daß horizontale Bewegungen von Kontinenten in der Tat stattfinden, so kann die Möglichkeit derartiger Bewegungen für vergangene Zeiten nicht in Abrede gestellt werden.

Damit sind wir berechtigt, dort, wo jede andere Erklärung versagt, mit Kontinentalverschiebungen zu rechnen, ja, wo nur diese zur vollen Lösung eines Problems führen, einen Beweis zu sehen für die Gültigkeit der Verschiebungstheorie. Deshalb vertreten wir mit A. WEGENER und anderen die Auffassung, daß zur Zeit der jungpaläozoischen Vereisungen die Südkontinente sich in einer anderen geographischen Lage befanden als heute. Abb. zeigt drei Versuche, diese Lage zu rekonstruieren. Eine endgültige Entscheidung ist noch nicht zu treffen. Sicher ist aber, daß diese Kontinente und mit ihnen Vorderindien näher am Südpol — dessen damalige Lage noch nicht über jeden Zweifel sicher steht — und näher beieinander gelegen haben müssen als heute. Eine Fixierung im Gradnetz hat neben der vorkarbonischen geologischen Entwicklung der betreffenden Kontinente vor allem auch zu berücksichtigen, daß in den genannten Vereisungsgebieten mehrere Vereisungen stattgefunden haben. Das Eis ist wiederholt weit zurück- oder ganz weggeschmolzen, und es finden sich jeweils über einem Tillit oder zwischen zwei zeitlich weitgetrennten Tilliten Ablagerungen, die unter günstigen klimatischen Verhältnissen entstanden sind. In Australien besonders sind aus verschiedenen solchen Zwischeneiszeiten Pflanzen bekannt geworden, die auf eine klimatisch keineswegs anspruchslose Flora hinweisen, sind während einer dieser Zwischeneiszeiten Kohlenflöze gebildet worden, die eine üppige Vegetation und ein stark gemildertes Klima voraussetzen lassen. Auch in Südamerika sind zwischen verschiedenen Tilliten Kohlenbildungen nachgewiesen.

Dieser Wechsel zwischen Eiszeiten und Nichteiszeiten bzw. Zwischeneiszeiten kann weder durch periodische Schwankungen der Pollage (periodische Änderungen in der Lage der Drehachse der Erde), noch durch einen wiederholten Wechsel in der Lage der Kontinente, ein wechselndes Zu- und Abtriften zum bzw. vom Pol, erklärt werden. Ein derartiges Pendeln wäre schon für nur einen Kontinent sehr unwahrscheinlich, für mehrere ist es ausgeschlossen. Es muß für die Zeit des Carbon und Perm mit einer, wenn vielleicht auch nicht dauernd gleichen, doch über lange Zeit sehr ähnlichen Lage der Südkontinente und Vorderindiens gerechnet werden. In den Zwischeneiszeiten kann der Polabstand nicht wesentlich anders als während der Eiszeiten gewesen sein. Damit ist sicher, daß eine nähere Lage zum Südpol nicht die direkte Ursache der Vereisungen auf der Südhalbkugel gewesen sein kann, denn auf gleicher geographischer Breite haben ja zeitweilig auch milde Klimate geherrscht. Es muß noch eine besondere, gewissermaßen zusätzliche Ursache den starken Klimawechsel bewirkt und damit auch zur Entwicklung der großen Vereisungen geführt haben. Es müssen die Südkontinente also nahe genug am Südpol gelegen haben, daß eine Temperatursenkung durch die zusätzliche Ursache zu Vereisungen führen konnte, sie müssen weit genug vom Südpol gelegen haben, daß eine Temperatursteigerung durch den zusätzlichen Faktor nicht nur das Wegschmelzen der Eismassen, sondern auch die Einsiedelung und die zur Bildung von Kohlenflözen notwendige üppige Entwicklung einer Landflora ermöglichen konnte. So nah am Südpol wie auf SALOMON-CALVI's Darstellung kann das brasilianische Vereisungsgebiet deshalb nicht gelegen haben. Denn es erscheint sehr zweifelhaft, ob der Wärme- und Lichtbedarf der Flora, die hier das Rohmaterial für die zwischeneiszeitlichen Kohlen lieferte, damals südlich des südlichen Polarkreises befriedigt werden konnte. Mit einer höheren Breite als 60 bis 65° wird nicht zu rechnen sein. Südamerika wird sich eher in der Lage zu Afrika befunden haben, die die Karte von DU TOIT zeigt. Wahrscheinlich ist, daß die vereisten Gebiete Südafrikas dem Südpol näher lagen als die Südamerikas, Australiens und Vorderindiens, und daß die Vereisungen dieser Kontinente bis zu 50° oder etwas über 50° s.Br. nach Norden reichten.

Es erhebt sich die Frage, welche geographische Lage besaßen zur Zeit der jungpaläozoischen Vereisungen der Südkontinente die Kontinente der Nordhalbkugel? Wenn auf der Südhalbkugel ausgedehnte Inlandeismassen bis zum 50. Breitengrad reichten, so sind auf den Festländern der Nordhalbkugel im gegenwärtigen Bereich des gemäßigten Klimas wenn auch nicht ohne weiteres Vereisungen, so doch wesentlich geringere Temperaturen als heute zu erwarten. In diesem Gebiet aber liegt die Hauptmasse der in weiten, üppig wuchernden Sumpfwäldern entstandenen karbonischen Kohlen, hier ist eine karbonische Flora überliefert, die ein feucht-warmes, ja, nach einigen Merkmalen ein tropisches oder nahezu tropisches Klima voraussetzt, auf das auch die Insekten dieser Zeit hinweisen. Und wenn sich auf Spitzbergen und der Bäreninsel zwischen 74° und 81° n.Br. eine klimatisch zwar weniger anspruchsvolle, aber doch wohl mindestens als nördlich-gemäßigt zu bezeichnende Karbonflora findet, in einem Gebiet, das bei damals gleicher Breitenlage wie heute weder dem Wärme- noch dem Lichtbedürfnis einer solchen Flora entsprochen haben kann, so dürfte nicht zweifelhaft sein, daß die Landmassen der Nordhalbkugel damals polferner, daß sie mit den Gebieten des karbonischen Kohlengürtels dem Äquator wesentlich näher gelegen haben müssen als heute.

Gegen diese Auffassung kann nicht eingewendet werden, Kohlenflora und Kohlenflöze seien zwischeneiszeitlich, und es habe damals im gegenwärtigen Bereich des gemäßigten ein wärmeres Klima deshalb bestanden, weil die solare Wärmestrahlung vor 250 bis 300 Millionen Jahren stärker gewesen sei als heute. Welche Gesteine im Carbon und Perm dieses Gebietes sollten dann als eiszeitlich gelten? Im Wechsel der Eiszeiten und Zwischeneiszeiten hätten in der heutigen gemäßigten Zone — bei einer der gegenwärtigen entsprechenden Lage der Nordkontinente — mit dem Klima auch das geologische und biologische Geschehen einem Wechsel unterworfen gewesen sein müssen; es wäre für Carbon und unteres Perm eine Großgliederung zu erwarten, in der die Wiederkehr gleicher Klimaverhältnisse in einem rhythmischen — unter der Einwirkung lokaler Faktoren hier und dort vielleicht etwas verschleierten — Wechsel der Gesteinsbildung und der Pflanzenbestände zum Ausdruck kommen müßte. Eine derartige Großgliederung hat sich

nicht nachweisen lassen, eine nur zwischeneiszeitliche Stellung der Kohlenflöze und der pflanzenführenden Gesteine läßt sich keinesfalls vertreten.

Freilich kann auch das äquatoriale Gebiet in damaliger Zeit von Klimaschwankungen nicht verschont geblieben sein. Aber diese müssen hier eine wesentlich geringere Amplitude besessen haben, und es können ihre Auswirkungen auf das geologische und das biologische Geschehen deshalb nur beschränkt gewesen sein. Eine klimatisch bestimmte, dem Wechsel von Eis- und Zwischeneiszeiten entsprechende Großgliederung nach Gesteinsbildung und Pflanzenbeständen ist nicht zu erwarten oder wird doch durch Einwirkung örtlicher Faktoren so weit verschleiert sein, daß sie nicht erkannt werden kann. Da in der Tat im Carbon und unteren Perm der gegenwärtigen nördlich-gemäßigten Zone eine derartige Großgliederung nicht zu erkennen ist, so erscheint auch von dieser Seite her die Auffassung berechtigt, daß die Nordkontinente und vor allem große Teile Eurasiens damals wesentlich südlicher gelegen haben. Ihre Lage im Gradnetz läßt sich noch nicht genauer eingrenzen. Wir müssen uns hier auf die Feststellung beschränken, daß die geologischen und biologischen Tatbestände des jüngeren Paläozoikum wie für die Süd-, so auch für die Nordkontinente eine nach Breite und Länge andere Lage erfordern, und daß das hinsichtlich der geographischen Breite eine südlichere Lage bedeutet.

Zu keinem anderen Ergebnis führt die Annahme, daß in permokarbonischer Zeit Afrika mit Südamerika und mit Australien über den atlantischen und den indischen Ozean durch Landmassen verbunden gewesen wäre, also ein großer Südkontinent, das sogenannte Gondwanaland, bestanden habe. Auch dann läßt sich, ob nun die hypothetischen Landbrücken selbst mit vereist waren oder nicht, keine die alten Vereisungen verständlich machende Pollage finden, wie schon vor Jahrzehnten KOKEN gezeigt hat. Und unverständlich bliebe auch in diesem Falle, ohne eine ehemals andere geographische Lage der Süd- und der Nordkontinente, das im Permokarbon abgelaufene geologische und biologische Geschehen auf den Nordkontinenten.

Es ist ein wesentlich anderes Erdbild als heute, das wir aus den Vereisungen der jungpaläozoischen Zeit abzuleiten gezwungen sind. Wir verlieren zunächst für viele erdgeschichtliche Fragen die wichtigste Grundlage, eine feste, über alle Zeiten hin gleiche geographische Lage der Kontinentalgebiete. Wir haben mit fortschreitenden Wandlungen zu rechnen, wie für die nach-, so für die vorpaläozoische Zeit. Auch im älteren Paläozoikum und im Eozoikum müssen die Kontinente eine von der gegenwärtigen abweichende Lage besessen haben. Die devonische Vereisung Südafrikas und die eocambrischen Vereisungen in Süd- und Mittelafrika und Australien deuten darauf hin, daß diese Kontinente sich damals, wie während des Carbon und Perm, polnäher befanden. Die genauere geographische Lage, und das gilt auch für die Nordkontinente, läßt sich aber noch nicht erkennen, und damit bleiben die Möglichkeiten einer vollen erdgeschichtlichen Ausdeutung dieser Vereisungen beschränkt.

IV.

Auch für die jungpaläozoischen Vereisungen stand eine wichtige Frage noch offen, die Frage nach dem besonderen Faktor oder Faktorenkomplex, der die Vereisungen heraufführte und der für den Wechsel von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten verantwortlich gewesen ist.

Diese Frage läßt sich aus der letzten großen Vereisungszeit im Ablauf der Erdgeschichte, aus dem quartären Eiszeitalter, einer prinzipiellen Klärung näher bringen. In dieser Zeit hatten die Kontinente ihre gegenwärtige Stellung bezogen. Das zeigt auf einer Weltkarte die Verbreitung der damals vereisten Gebiete. Sie sind auf beiden Halbkugeln so unverkennbar polar orientiert, daß Breiten- und Längelage der Kontinente der gegenwärtigen mindestens nahezu entsprochen haben muß.

Entscheidend für die genetische Beurteilung des quartären Eiszeitalters sind die großen Vereisungen der Nordhalbkugel, die ausgedehnten Eisdecken in Eurasien und in Nordamerika. Von den zahlreichen Theorien, die zur Erklärung dieser der „warmen“ Tertiärzeit folgenden Vereisungsperiode aufgestellt worden sind, scheidet alle diejenigen aus, die nur eine einmalige Vereisung ver-

ständig zu machen vermögen. Denn auch während des quartären Eiszeitalters haben Zeiten stärkerer Vereisungen mit solchen gewechselt, in denen die Eismassen keine größere, ja, eine geringere Ausdehnung besaßen als heutzutage; es gab Eiszeiten und Zwischeniszeiten. Dementsprechend muß der auslösende Faktor wechselnd Temperaturminderungen und Temperatursteigerungen bedingt haben. Es gelang, einen solchen Faktor in einem periodisch ändernden Strahlungsempfang der Erde nachzuweisen. Besonders KÖPPEN, MILANKOVITCH, PILGRIM und SPITALER haben sich auf diesem Gebiet Verdienste erworben.

Die von der Sonne der Erde zukommende Wärmemenge ist in ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung Schwankungen unterworfen dadurch, daß die Exzentrizität der Erdbahn, die Schiefe der Ekliptik und die heliozentrische Länge des Perihel periodische Änderungen erfahren. Diese Änderungen wirken sich dahin aus, daß die einzelnen Teile der Erdoberfläche zeitweise eine größere oder eine geringere Wärmemenge als gegenwärtig empfangen. Für die letzte Million Jahre haben sich diese Schwankungen im Wärmeeingang nach ihrem zeitlichen Ablauf und nach ihrem Ausmaß berechnen lassen. MILANKOVITCH hat die Ergebnisse dieser seiner Rechnungen in Kurven dargestellt, die im Gang der sommerlichen Bestrahlung den wiederholten Wechsel vieltausendjähriger kalter und warmer Perioden bzw. Perioden mit kalten und Perioden mit warmen Sommern erkennen lassen. Da in den Jahrtausenden mit kalten Sommern die Abschmelzung der winterlichen Schneemassen und, wo sie schon bestanden, der Gletscher geringer gewesen sein muß als heute, so blieben Schnee und Eis in größerem Maße erhalten. Es wuchsen, hangabwärts zunehmend, die Gebiete, in denen auch im Sommer eine Schneedecke überdauerte; die Grenzen gegen die im Sommer schneefrei werdenden Gebiete, die sog. Schneegrenze, sank aus höheren in tiefere Regionen ab. In welchem bedeutendem Ausmaß, das zeigen die bei der Strahlungskurve von MILANKOVITCH angegebenen Werte. Es war eine wesentliche Voraussetzung für eine Ausdehnung der Schnee- und Eismassen, damit für wachsende Vereisungen erfüllt. Die Kaltsommerperioden entsprechen den Zeiten der Vereisungen, die Warmsommerperioden den Zeiten der Eisrückschmelzung und den eisarmen Perioden, den Zwischeneiszeiten.

Die Gültigkeit dieser Deutung konnte erst durch geologische Befunde sichergestellt werden. Denn es mußte der Nachweis erbracht sein, daß die Zahl der ausgesprochenen Kaltsommerperioden mit der Zahl der quartären Vereisungen übereinstimmt, daß das Ausmaß der Temperatursenkung und die zeitliche Dauer der Kaltsommerperioden mit der Ausdehnung der zugeordneten Vereisungen im Einklang steht, und daß die zeitlichen Intervalle zwischen den Kaltsommerperioden den zeitlichen Intervallen zwischen den Vereisungen größenordnungsmäßig und damit in der Staffelung der Zeitdauerwerte entsprechen. Es ist nicht unwesentlich, daß schon vor Veröffentlichung der Strahlungskurve MILANKOVITCH's eine geologische Gliederung des Eiszeitalters begründet worden war, die die geforderte Übereinstimmung mit dieser Kurve, d. h. mit der astronomischen Gliederung des quartären Eiszeitalters zeigt (SOERGEL 1924, 1925). Danach kann an der Bedeutung des Strahlungsganges für das Entstehen von Vereisungen, für den Wechsel von Eis- und Zwischeneiszeiten kein Zweifel sein.

Mit der Lösung einer prinzipiellen genetischen Frage gab uns die Strahlungskurve zugleich die absolute Zeitgliederung des Eiszeitalters, das feste Maß für die Dauer geologischer und biologischer Vorgänge. Es läßt sich für Vormarsch und Rückschmelzung der nordischen Eismassen sowie für die Zwischeneiszeiten die Zeitstreckung beurteilen. Die während des Eiszeitalters abgelaufene stammesgeschichtliche Entwicklung der Säugetiere ist in ihren verschiedenen Stadien zeitlich zu fixieren, die Zahl der Generationen zu berechnen, über die ein in den Hartgebilden des Organismus dokumentierter Fortschritt erreicht wurde. Dasselbe gilt für die Stammesgeschichte des Menschen, dessen verschiedene eiszeitalterliche Kulturen in ihrer Zeitstellung vor heute und in ihrer Dauer nach Jahrtausenden bestimmt sind.

Diese Fortschritte gründen sich auf die Erkenntnis, daß eine Anzahl astronomischer Elemente periodisch ändern und durch dieses Ändern — wahrhaft exogene Faktoren — den Strahlungsempfang und damit die Temperaturverhältnisse auf der Erde beeinflussen. Es ist kein Zweifel, daß diese Faktoren schon in sehr frühen Zeiten

der Erdgeschichte wirksam gewesen sind, daß also auch zur Zeit der jungpaläozoischen Vereisungen der Strahlungsempfang der Erde von ihnen abhängig war.

Sind sie auch damals eine wesentliche Ursache für das Entstehen großer Vereisungen, für den Wechsel von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten gewesen?

Man hat geglaubt, diese Frage verneinen zu müssen, weil die Zwischeneiszeiten des jungpaläozoischen Eiszeitalters nach der Mächtigkeit ihrer Gesteinsbildungen von größerer, zum Teil von ganz wesentlich größerer Dauer als die des quartären Eiszeitalters gewesen sind. Lassen sich diese, wie aus einer glaziologischen Umwertung der Strahlungskurve (aus der Vereisungskurve) abgeleitet werden kann, nach Jahrzehntausenden, für die größte Zwischeneiszeit nach vielen Jahrzehntausenden, messen, so ist die Dauer der jungpaläozoischen Zwischeneiszeiten unter der begründeten Voraussetzung, daß Carbon und Perm zusammen eine Zeit von rund 100 Millionen Jahren umfassen, mit Jahrhunderttausenden, für die größten Zwischeneiszeiten mit über 1 Million, vielleicht mit mehreren Millionen Jahren anzusetzen. Dieser bedeutende Unterschied in der Zeitstreckung schließt aber keineswegs aus, daß auch in jungpaläozoischer Zeit der Wechsel von Eis- und Zwischeneiszeiten wesentlich durch den Gang der Strahlung bestimmt war. Erstens wird man es mit KERNER-MARILAUN für „denkbar“ halten, „daß die astronomischen Bahnelemente in grauer Vorzeit andere Werte erreichten als jene, welche sich aus den auf die heutigen Verhältnisse basierten Störungstheorien berechnen ließen“ Es würde dann auch mit anderen Werten für die Schwankungen des Strahlungsempfanges der Erde zu rechnen sein. Wenn in der Strahlungskurve für die letzte Million Jahre die Intervalle zwischen den einzelnen Strahlungsminima (Kaltsommerperioden) verschieden groß sind, und bei 800 000 vor heute, wie EBERL betont, eine deutliche Änderung im Schwingungsrhythmus sich zeigt, so kann für den Strahlungsgang einer 200 bis 300 Millionen Jahre zurückliegenden Zeit die Möglichkeit eines anderen Schwingungsrhythmus und anderer Intervalle zwischen den Strahlungsminima nicht in Abrede gestellt werden, sie werden sogar als wahrscheinlich zu bezeichnen sein.

Aber auch wenn der Strahlungsgang zur Zeit des Carbon und Perm dem zur Zeit des Quartär nach Schwingungsrhythmus und Länge der Intervalle ähnlich gewesen sein sollte, so muß aus einem anderen Grunde der zeitliche Abstand zwischen den zu Vereisungen führenden Strahlungsminima und damit die Dauer der Zwischeneiszeiten viel größer gewesen sein. Nach den Vorstellungen, die wir uns über den Entwicklungsgang der Sonne zu machen berechtigt sind, ist damit zu rechnen, daß im Laufe sehr langer Zeiträume die Ausstrahlung der Sonne geringer geworden ist. Die Abnahme der Strahlung wird sich auch über den geologisch zu kontrollierenden Teil der Erdgeschichte fortgesetzt haben, zumal dieser Teil ein wesentliches Stück des Zeitraumes darstellt, über den sich die Entwicklung der Sonne vollzog. Es wird im Quartär die Sonnenstrahlung und damit der Wärmeempfang der Erde geringer gewesen sein als vor 200 bis 300 Millionen Jahren im Carbon und Perm. Deshalb werden Strahlungsminima von einer Intensität, die im Quartär zur Heraufführung ausgedehnter Vereisungen genügte, im Carbon und Perm unter sonst gleichen geographischen Bedingungen zur Heraufführung entsprechender Vereisungen nicht genügt haben. Die großen Vereisungen des Carbon und Perm können nur auf Strahlungsminima von größerer Intensität, auf die stärksten Minima bezogen werden, die viel seltener als die Minima mittleren und geringeren Ausmaßes und daher nur in großen zeitlichen Intervallen eingetreten sind. In der Strahlungskurve für die letzte Million Jahre stehen die beiden stärksten Minima (230 00 und 835 000 Jahre vor heute) in einem zeitlichen Abstand von 605 000 Jahren. Diese die Zwischeneiszeiten einschließenden Intervalle können im Strahlungsgang einer 200 bis 300 Millionen Jahre zurückliegenden Zeit bei einem wahrscheinlich anderen Schwingungsrhythmus wesentlich größer gewesen sein.

Es lassen sich also aus der großen Mächtigkeit jungpaläozoischer Zwischeneiszeit-Ablagerungen und der daraus zu folgernden langen Dauer dieser Zwischeneiszeiten keine Bedenken gegen die Auffassung herleiten, daß wie im quartären so im jungpaläozoischen Eiszeitalter der Wechsel von Eis- und Zwischeneiszeiten vom Gang der Strah-

lung bestimmt wurde. Eine besondere Erklärung braucht in einer dem Strahlungsgang noch übergeordneten langperiodischen Ursache nicht gesucht zu werden.

Die Bedeutung des Strahlungsganges für das jungpaläozoische Eiszeitalters läßt sich auch nicht durch den Hinweis in Zweifel ziehen, daß die Dauer der Eiszeiten, wie aus der in manchen Gebieten außerordentlichen Mächtigkeit der glazigenen Gesteine geschlossen wurde, wesentlich größer als die der quartären Eiszeiten gewesen wäre. Zunächst ist die Mächtigkeit glazigener Gesteine keineswegs nur eine Funktion der Zeit. Es können mancherlei geologische Faktoren (Gesteinscharakter und Ausmaß der präglazialen Gesteinsverwitterung im glazialen Abtragungsgebiet, Oberflächengliederung im Abtragungsgebiet, Oberflächengliederung im Ablagerungsgebiet, Ruhelage oder Senkung im Ablagerungsgebiet und andere mehr) vor der Zeit für die erreichte Mächtigkeit ausschlaggebend gewesen sein. Wo für Tillite allerdings Mächtigkeiten zwischen 1500 und 2800 Fuß angegeben werden, da wird mit einer recht langen, die der quartären übersteigenden Dauer der Vereisungen zu rechnen sein. Eine längere Vereisungsdauer aber besagt noch nicht, daß die Zeitlänge des bedingenden Strahlungsminimums sehr viel größer als die quartärer Strahlungsminima gewesen sei. Es können die im Ablauf des bedingenden Strahlungsminimums entwickelten Eismassen so ausgedehnt und mächtig geworden sein, daß sie und ihre geologische Arbeit in Abtragung und Ablagerung noch sehr weit in eine Folgezeit mit höherer Strahlung fort dauerten. Das wird vor allem in polnäheren Gebieten der Fall gewesen sein.

Andererseits ist mit einer etwas längeren Dauer der für die permokarbonischen Vereisungen verantwortlichen Minima oder Kaltsommerperioden deshalb zu rechnen, weil ja hier, wie oben gezeigt wurde, nur starke Minima wirksam werden konnten und diese nicht nur in der Intensität, sondern in geringerem Grade auch in der Dauer die Minima mittleren Ausmaßes übertreffen.

So lassen sich aus der Dauer weder der Zwischeneiszeiten noch der Eiszeiten, noch aber auch aus irgendwelchen anderen Eigenschaften des jungpaläozoischen Eiszeitalters Bedenken herleiten gegen die Auffassung, daß auch hier Aufkommen und Verlauf von

Eiszeiten und Zwischeneiszeiten im Rahmen der geographischen Gegebenheiten durch den Strahlungsgang bestimmt wurden. Irgendwelcher, vielleicht nicht unmöglicher, aber nicht beweisbarer zusätzlicher Annahmen (z. B. Durchgang unseres Sonnensystems durch kosmische Nebel) bedarf es zur Erklärung nicht.

Da die Schwankungen im Strahlungsgang über die Dauer der Erdgeschichte, wenn wohl auch mit änderndem Schwingungsrhythmus, wirksam waren, so werden sie auch für ältere, für die cocambrischen und frühpalgonkischen Vereisungen die Bedeutung eines anregenden, in Gang setzenden Faktors gehabt haben. Eine nähere Beurteilung ist für so fern liegende Zeiten heute noch nicht möglich. Auch für jüngere Eiszeiten bleiben noch mancherlei Fragen offen. Aber in den Umrissen sind die wesentlichen Bedingtheiten der im Ablauf der Erdgeschichte eingetretenen großen Vereisungen erkannt, ebenso die Bedeutung dieser Vereisungen für Grundfragen der Erdgeschichte:

Die Vereisungen der Vergangenheit beweisen uns, daß schon vor 1000 Millionen Jahren die physikalischen Verhältnisse auf der Erdoberfläche prinzipiell die gleichen waren wie heute, daß die geographische Lage der Kontinente in früheren Zeiten eine andere war als gegenwärtig und daß exogene, in der Massenverteilung und in den Bahnelementen unseres Planetensystems gründende Faktoren die Entwicklung des Klimas und mit ihr den Gang des geologischen und des biologischen Geschehens wesentlich mitbestimmt haben.

Literaturverzeichnis

Aus der sehr umfangreichen Literatur können hier nur einige wenige Arbeiten genannt werden; einmal solche, die nach Inhalt und nach Literaturverzeichnis eine weitere Orientierung ermöglichen über die vielerlei Fragen, die mit den Vereisungen der Vergangenheit gestellt sind oder zusammenhängen, dann diejenigen, aus denen Bilder entlehnt wurden.

BUBNOFF, S. v.: Einführung in die Erdgeschichte. 1. Teil. Gebr. Borntraeger, Berlin 1941.

COLEMAN, A. P.: Ice Ages, Recent and ancient. Macmillan Comp. New York, 1926.

EBERL, B.: Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland. B. Filser, Augsburg 1930.

KAYSER, E.: Lehrbuch der geologischen Formationskunde. 6. 7. Auflage, 1. Bd., 1923.

- KERNER-MARILAUN, F.: Palaeoklimatologie. Gebr. Borntraeger, Berlin 1930.
- KOEPPE, W. und WEGENER, A.: Die Klimate der geologischen Vorzeit. Gebr. Borntraeger, Berlin 1924.
- KUKUK, P.: Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes. Berlin 1938.
- LEINZ, W.: Petrographische und geologische Beobachtungen an den Sedimenten der permo-karbonischen Vereisungen Südbrasilien. Neues Jahrbuch f. Min. etc. Beil. Bd. 79, Abt. B, 1938.
- MILANKOVITCH, M.: Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate. Handbuch d. Geophysik. Bd. IX, Berlin 1938.
- Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrad 1941.
- SALOMON-CALVI, W.: Die Permokarbonischen Eiszeiten. Akad. Verlagsgesellsch. Leipzig 1933.
- SOERGEL, W.: Die Gliederung und absolute Zeitrechnung des Eiszeitalters. Fortschr. d. Geol. u. Palaeontologie, H. 13, Berlin 1925.
- Die Vereisungskurve. Gebr. Borntraeger, Berlin 1937.
- TOIT, A. L. du: Our Wandering Continents. Oliver and Bayd, London 1937.
- WEGENER, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 4. Aufl., Braunschweig 1929.
- WEIDMANN, S.: Was there Pennsylvanian-Permian Glaciation in the Arbuckle and Wichita Mountains of Oklahoma? Journal of Geology, Vol. XXXI, 1923.
- WOLDSTEDT, P.: Das Eiszeitalter. F. Enke, Stuttgart 1929.
- WUNDT, W.: Die Mitwirkung der Erdbahnelemente bei der Entstehung der Eiszeiten. Geol. Rundschau, Klimaheft, Bd. 34, 1944.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 1949

Band/Volume: [39](#)

Autor(en)/Author(s): Soergel Wolfgang

Artikel/Article: [Die Eiszeiten im Ablauf der Erdgeschichte 123-148](#)