

Ueber die allgemeine atmosphärische Zirkulation während der diluvialen Vereisungsperioden

Von GÜNTER VIETE

Humboldt-Universität zu Berlin

(Manuscript received 6 December 1949)

Abstract

The range of polar cold air over the northern hemisphere was increased during the glacial periods primarily due to the extension of the large ice shields. Particular in the northatlantic region the atmospheric centers of action and the storm tracks were shifted southwards, the meridional temperature gradient was strengthened and consequently the general circulation increased. This intensification of the large scale exchange of air does not contradict the recent increase of the general circulation and its consequences, since during the glacial periods the increase was of a compulsory and secondary nature caused by the ice extension itself. On the contrary the atmospheric circulation at the beginning of the glaciation must have been decreased. However, the continued extension of the Scandinavian ice shields, as well as the creation of the Keewatin and Labrador shields in North America and the North Asian glaciation, occurred during periods of secondarily increased circulation. An examination of the most important Ice age theories shows that the primary weakening of the circulation may be satisfactorily explained only by assuming a decrease of the earth's solar radiation supply. The astronomical Ice age theory is applicable only in connection with the assumption of an uplift of the Iceland-Faerisland submarine ridge.

In den letzten 20 Jahren sind unsere Kenntnisse der klimatischen Verhältnisse im Diluvium durch zahlreiche Arbeiten von geologischer, meteorologischer, geographisch-morphologischer und botanischer Seite ausserordentlich erweitert worden. Es liegt daher der Gedanke nahe, von der Analyse der regionalen Klimate zu einer Synthese des Zustandes der Atmosphäre überzugehen und zu versuchen, Ablauf und Intensität der allgemeinen Zirkulation in den Vereisungsperioden zu rekonstruieren. Es finden sich zwar in mehreren Arbeiten über das Diluvialklima Hinweise auf die Zirkulationsverhältnisse — besonders bei KLUTE (1930), WUNDT (1943), MEINARDUS (1937) und BÜDEL (1949) —, jedoch fehlt bisher eine Koordinierung der aus den Beobachtungen abgeleiteten Schlussfolgerungen mit den für Entstehung, Erhaltung und

Vergehen des Inlandeises zu fordernden Verhältnissen.

Die mangelnde quantitative Erfassung und Deutung des gegenwärtigen Luftkreislaufes und das Fehlen von genaueren Angaben über die meteorologischen Elemente und Faktoren in der geologischen Vorzeit verhindern eine exakte Behandlung der Paläozirkulation. Man muss sich daher auf quantitative Betrachtungen beschränken und die jeweilige Zirkulation als einen vom Temperatur- und Druckgradienten abhängigen Austauschvorgang mit den gegenwärtigen Verhältnissen vergleichen. Voraussetzung für eine derartige Behandlungsweise ist, dass das Grundschema des Luftkreislaufes damals das gleiche war wie heute. Diese Bedingung dürfte ohne weiteres erfüllt sein, da keine Anzeichen und Gründe für Veränderungen der den atmosphärischen Vor-

gängen zugrundeliegenden physikalischen Gesetze vorhanden sind.

1. Diluvialklima und Zirkulation

Es gilt zunächst zu untersuchen, welche Aussagen über die allgemeine Zirkulation auf Grund der »beobachteten« Klimaverhältnisse zur Zeit des Höchststandes der letzten Vereisung — bzw. während einer Zeit maximaler Eisausdehnung — gemacht werden können. Vergleicht man die gegenwärtige Eisbedeckung der polaren Gebiete und die Verteilung der Klimate mit den Verhältnissen während der Glazialzeiten, so ergibt sich, dass auf der Nordhemisphäre durch die sich in Mitteleuropa bis etwa 55° N, in Nordasien bis etwa 60—65° N und in Nordamerika sogar teilweise bis zum 40. Breitengrad erstreckenden Eismassen die Grenze des polaren (bzw. nivalen) Klimagürtels bis zu 25 Breitengrade südwärts verschoben war. Dementsprechend mussten sich auch die übrigen Klimabereiche äquatorwärts verlagern, worauf erstmalig PENCK (1913) hingewiesen hat und was später von KLUTE (1930) und kürzlich von BÜDEL (1949) durch die Verschiebung der Vegetations- und Landschaftsgürtel im mittel- und südeuropäischen Raum anschaulich dargestellt worden ist. Auf der Südhemisphäre muss eine gleichsinnige Verschiebung der Klimazonen stattgefunden haben, allerdings in weitaus schwächerem Umfange, da die antarktische Eiskappe gegenüber der Jetztzeit nur eine geringe Zunahme der Flächenausdehnung (bis zum Schelfrand) erfahren haben kann. Gleichzeitig mit der Verschiebung der Klimazonen bzw. in kausalem Zusammenhang damit müssen naturgemäss auch Änderungen in den grossräumigen Strömungsverhältnissen stattgefunden haben, d. h. die atmosphärischen Aktionszentren müssen gegenüber ihrer jetzigen Lage verschoben gewesen sein.

Für den nordatlantisch-europäischen Raum ergibt sich folgendes Bild:

1. Die nordatlantische Depression (Islandtief) war durch die ausgedehntere Eisbedeckung des Skandik — Scholleneis, Eisberge und mindestens im Winter auch Packeis — südwärts auf etwa 50° Nordbreite (mit jahreszeitlichen Schwankungen von etwa 10—15 Breitengraden) verlagert und ihre

Intensität infolge der stärkeren Temperaturgegensätze zwischen dem relativ warmen Nordatlantik (Golfstrom) und dem europäischen Nordmeer gegenüber der Jetztzeit verstärkt.

Die Annahme von PENCK (1937), dass der Golfstrom damals nicht vorhanden war, trifft sicher nicht zu. Es ist zwar wahrscheinlich, dass seine Intensität infolge der veränderten Küstenkonfiguration im westindischen Raum (eustatische Senkung des Meeresspiegels) damals schwächer war; er muss jedoch als Teil der nordatlantischen Zirkulation unbedingt vorhanden gewesen sein. Zudem entfällt bei Annahme eines völlig kalten Nordatlantik jede Möglichkeit, die Herkunft der zur Bildung des eurasischen Inlandeises notwendigen Feuchtigkeitsmengen zu erklären (BEHRMANN 1948).

2. Über die Lage der nordatlantischen Hochdruckzelle sind keine genaueren Aussagen möglich. Es kann angenommen werden, dass auch dieses Aktionszentrum im Jahresmittel um einige Breitengrade südwärts verlagert war.
3. Die Temperaturgegensätze in meridionaler Richtung zwischen den gemässigten und subtropischen Breiten sowie zonal zwischen den eisfreien Meeres- und Landgebieten der mittleren Breiten waren erheblich grösser als gegenwärtig. Das Quellgebiet der Arktikluft reichte damals entsprechend der Eisbedeckung 20—25 Breitengrade weiter südwärts als heute.

Der häufig vorgetragene Einwand, dass eine Verschärfung der meridionalen Temperaturgegensätze in den Glazialperioden nicht anzunehmen sei, da es Zeiten einer generellen Temperaturabnahme auf der Erde waren, ist nicht stichhaltig. Es werden zwar bei einer Verminderung der solaren Zustrahlung — sofern man das als Ursache der diluvialen Klimaänderungen ansieht — die tropischen Gebiete stärker betroffen als die höheren Breiten (Ausgleich der Gegensätze), jedoch muss in den letzteren Gebieten als sekundärer Effekt die verstärkte Strahlungsreflexion (WUNDT 1938 a) und der Verbrauch von Schmelzwärme durch die Eismassen berücksichtigt werden. Für die Verstärkung der

- Gegensätze zwischen Land und Meer wird besonders die sommerliche Erwärmung der periglazialen Gebiete gegenüber dem durch die Eisschmelze kühlen Nordatlantik ausschlaggebend gewesen sein.
4. Aus der Verlagerung des nordatlantischen Zentraltiefs und der Verstärkung der meridionalen Temperaturoegensätze ergibt sich zwangsläufig, dass in den Glazialperioden der meridionale Druckgradient Azorenhoch — Islandtief verschärft und damit der Luftaustausch zwischen den mittleren und subtropischen Breiten, d. h. die aussertropische Zirkulation, verstärkt waren.
 5. Aerologische Untersuchungen über die jetzige Höhenlage der Tropopause legen den Schluss nahe, dass in den Glazialzeiten das meridionale Gefälle dieser Diskontinuitätsfläche erheblich stärker war als heute. Entsprechend der Ausdehnung der Arktikluft werden damals im mitteleuropäischen Raum ähnliche oder noch extremere Verhältnisse geherrscht haben wie heute im Winter Nordostsibiriens, wo die Tropopause mit weniger als 8 km Höhe ihre niedrigste Lage erreicht. — Die von KLUTE (1930) angenommene Absenkung der Tropopause über dem Inlandeis bis auf 1 km Höhe dürfte jedoch unzutreffend sein. — Daraus ergibt sich, dass wahrscheinlich auch an der Tropopause der Druck- und Temperaturgradient verstärkt waren.
 6. Infolge der Verschärfung der meridionalen Druck- und Temperaturoegensätze war während der Glazialzeiten die atlantische Polarfront sehr kräftig entwickelt (zeitweiliger Zusammenfall von Arktik- und Polarfront im heutigen Sinn) und wegen der Ausdehnung der Arktikluft südwärts verschoben. Dementsprechend müssen auch die sich an der Front ausbildenden Wellenstörungen sehr intensiv und von längerer Lebensdauer als heute gewesen sein und sich zudem auf im Mittel südlicheren Bahnen bewegt haben.

Im Sommer verlief die Frontalzone wahrscheinlich über Mitteleuropa, und die wegen der starken Temperaturoegensätze zwischen den periglazialen und vereisten Gebieten ausserordentlich kräftig ausgebildeten und zahlreichen Depressionen drangen sowohl auf der

Zugstrasse I über die Eisgrenze weit nach Norden und Nordosten als auch auf den südlicheren Zugstrassen (IV und V) weit ostwärts vor. Die Annahme einer als Sperre wirkenden hochreichenden glazialen Antizyklone über dem nordischen Inlandeis (im Sinne von HOBBS) kann wohl nach den neueren Untersuchungen über die grönländischen Verhältnisse (GEORGI 1939, DORSEY 1945) endgültig verlassen werden. Die mit der planetarischen Westdrift vom Nordatlantik heraufziehenden Zyklonen rollten entweder die relativ flache, bodennahe Kaltluft auf oder wurden durch diese vom Boden abgehoben, okkludierten und drangen als Warmluftreste weiter »eiseinwärts« vor (BLÜTHGEN 1942). Nur auf diese Weise konnten den Eismassen die für ihre Ernährung und Erhaltung notwendigen Niederschlagsmengen zugeführt werden. — Im Winter wird sich die Hauptzyklonentätigkeit entsprechend der etwas südlicheren Lage der Frontalzone vorwiegend auf den südlichen Zugstrassen abgespielt haben.¹ Für den mediterranen Raum ergibt sich damit: im Jahresmittel Vorherrschaft westlicher Winde (stärkere Senkung der eiszeitlichen Schneegrenze an den Westhängen der mediterranen Gebirge gegenüber den Osthängen!) und gegen heute eine Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge, womit die im Mittelmeerraum und in Nordafrika beobachteten »Pluvialzeiten«, d. h. die Südwärtsverlagerung vom polaren Rand des nördlichen Trockengürtels, eine zwanglose Erklärung finden (KLUTE 1930).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass während der Glazialzeiten im nordatlantisch-europäischen Raum die aussertropische Zirkulation gegenüber der Jetztzeit allein auf Grund der Anwesenheit der nordischen Eisbedeckung verstärkt gewesen sein muss. — Es sei bemerkt, dass BÜDEL (1949) auf Grund der Verbreitung

¹ Nach Fertigstellung des Manuskriptes erhielt ich von Herrn Prof. Dr. F. KLUTE freundlicherweise einen Sonderdruck seiner letzten Veröffentlichung über das Diluvialklima zugesandt (KLUTE 1949). Die in vorliegender Arbeit skizzierten Zugstrassen der Depressionen sind u. a. darin in ihrer Bedeutung näher erläutert und in Kartenskizzen anschaulich dargestellt.

der Löstundra und Löss-Steppe in Europa für eine Abschwächung der Westdrift eintritt, worauf an anderer Stelle näher eingegangen werden soll.

Eine analoge Ableitung der atmosphärischen Verhältnisse für die übrigen Gebiete der mittleren Nordbreiten ist wegen mangelnder Beobachtungsgrundlagen (mit Ausnahme des nordamerikanischen Raumes) nicht möglich. Die allgemeinen Grundtatsachen der Diluvialmeteorologie deuten jedoch durchweg auf eine Verstärkung des aussertropischen Luftkreislaufes während der Vereisungsperioden:

1. In Nordamerika herrschten bezüglich der Ausbreitung der Arktikluft und der Verschiebung der Klimazonen ähnliche Verhältnisse wie in Europa, d. h. der meridionale Temperaturgradient war auch hier erheblich verschärft. Dadurch wurden die Zyklonentätigkeit und die Häufigkeit der in diesem Gebiet gefürchteten Kaltlufterbrüche und der Warnluftvorstösse vergrößert und ihre Intensität verstärkt. Da die Kaltlufterbrüche Nordamerikas (Blizzard) in der Gegenwart allgemein weitaus stärkere Schneefälle auslösen als die des mitteleuropäischen Raum, kann die erwähnte Intensivierung der meridionalen Temperaturunterschiede in den Vereisungsperioden und der sich daraus ergebende in Nordamerika völlig ungehinderte meridionale Luftaustausch als ein wesentlicher Grund für die grössere Mächtigkeit des nordamerikanischen Inlandeises gegenüber dem europäischen angesehen werden.
2. Die diluvialen Eisverhältnisse im nordpazifischen Raum sind weitgehend unbekannt. Es ist wahrscheinlich, dass mindestens zur Zeit maximaler Eisausdehnung (Riss) die bis etwa 62° N reichende Landbrücke zwischen Asien und Nordamerika (eustatische Senkung des Meeresspiegels — heutige Meerestiefe bis 62° N maximal 66 m) vereist und weitere Gebiete der Beringsee packeisbedeckt waren. Je nach Stärke der Eisbedeckung in diesen Gebieten muss das Aleutentief mehr oder weniger südwärts verlagert und damit der Druckgradient in den mittleren Breiten des Nordpazifik verschärft gewesen sein.
3. Die stärkere Vereisung des Nordwest-Pamir im Diluvium ist, wie schon v. FICKER (1933) feststellte, nur durch eine Vermehrung der

Niederschläge, d. h. durch eine Verstärkung der Zyklonentätigkeit in diesem Gebiet zu erklären.

4. Das Gleiche gilt auch für die nord- und nordostasiatischen Eisschilde, die sich in Gebieten entwickelten, welche heute zum polaren Trockenklima gehören.

In diesem Zusammenhang sei auf die Untersuchung von ALBRECHT (1947) hingewiesen, in der gezeigt wird, dass gegenwärtig der gesamte asiatische Raum nordwärts des 50. Parallel ausschliesslich aus dem nordatlantischen Verdunstungsgebiet mit Feuchtigkeit versorgt wird, da die küstenparallelen Gebirge Ostsibiriens das Eindringen feuchter Strömungen vom Pazifik verhindern. Die nord-sibirischen Eisgebiete können somit nur durch eine verstärkte Wasserdampfzufuhr vom Nordatlantik bzw. durch häufiges Vordringen zyklonaler Störungen etwa auf der Bahn Mittelmeer-Schwarzmeer-Kaspisee nach Nordosten erklärt werden.

Auf der Südhemisphäre sind wegen der geringen Landbedeckung in den gemässigten Breiten nur sehr wenige Ansatzpunkte vorhanden, die Rückschlüsse auf die diluvialen Zirkulationsverhältnisse zulassen. Der antarktische Kontinent befindet sich gegenwärtig zweifellos noch immer in einer Glazialperiode, jedoch würden an zahlreichen Stellen Antarktikas Anzeichen einer noch stärkeren Vereisung in jüngerer Vergangenheit beobachtet. Diese verstärkte Eisbedeckung konnte sich aber weniger in einer vergrößerten Flächenausdehnung als in einer Zunahme der Mächtigkeit des Eises auswirken, da eine Ausbreitung der Eiskappe nur bis zu dem vom heutigen Eisrand allgemein nicht weit entfernten Schelfrand möglich war. Jedoch wird die Packeisbedeckung der südpolaren Meeresgebiete sicher ausgedehnter gewesen sein als gegenwärtig. Daraus folgt, dass der für die Nordhalbkugel abgeleitete Effekt: Ausdehnung der Eisgebiete — Verschiebung der Klimazonen und Aktionszentren — Verstärkung der aussertropischen Zirkulation in den mittleren und hohen Südbreiten sicher erheblich schwächer ausgeprägt war. Es liegen aber auch aus Chile, Südafrika und Südastralien Beobachtungen vor (KLUTE 1930), dass hier in jüngster Vergangenheit — analog den nordhemisphärischen Verhältnissen — der polare Rand des südlichen Trockengürtels

äquatorwärts verschoben war. Man kann somit feststellen, dass auch auf der Südhalbkugel in den Glazialperioden des Diluviums die ausser-tropische Zirkulation gegenüber der Jetztzeit verstärkt war.

Derartige Verhältnisse werden von BRÜGEN und MORTENSEN auch zur Erklärung der starken Depression der eiszeitlichen Schneegrenze in den nord- und mittelchilenischen Anden sowie der mächtigen Tal-schotter in den gegenwärtig vollariden Gebieten Nordchiles gefordert. Dabei kann angenommen werden, dass der sogen. abnorme Wittertyp Chiles mit kurzen aber ausserordentlich kräftigen Niederschlägen gegenüber heute erheblich öfter und anhaltender eingetreten ist (VIETE 1949).

Nach der Besprechung der ausser-tropischen Zirkulation beider Hemisphären gilt es nun noch den tropischen oder Passatkreislauf in den Glazialperioden zu untersuchen.

1. Im äquatorialen Afrika konnten NILSSON (1940) im Hochland von Semien (Abessinien), am Ruwenzori, Mt. Kenya und Mt. Elgon sowie H. MEYER und KLUTE am Kilimandscharo starke mehrmalige Senkungen der Schneegrenze im Diluvium und z. T. 2—3 Vergletscherungsphasen nachweisen. Aus der Hangdisposition der eiszeitlichen Gletscherkappe des Kilimandscharo im Vergleich zur rezenten schloss KLUTE, dass damals wie heute die niederschlagsbringenden Winde aus östlicher Richtung kamen.
2. Durch eingehende Untersuchungen von Strandlinien und Terrassen an Seen in Britisch-Ostafrika gelang NILSSON (1940) der Nachweis von 3 Pluvialperioden, von denen die zweite am kräftigsten ausgeprägt war und die sich eindeutig mit den erwähnten Vergletscherungsphasen parallelisieren lassen.
3. In Indien wiesen DE TERRA und PATERSON (1939) im Gebiet von Kaschmir 4 Glazialperioden und in Nordwest-Punjab sowie in den Tälern des Indus und Chenab und in Zentralindien 4 diesen Eiszeiten parallele Pluvialperioden nach. Aus der Ablagerung des diluvialen Löss in Kaschmir und in Nordwest-Punjab folgerten sie, dass damals die mittlere Windrichtung zur Zeit der Sedimentation die gleiche war wie heute, dass aber die Intensität der

gegen den Himalaya gerichteten Luftströmungen erheblich stärker gewesen sein muss.

4. Von wesentlicher Bedeutung ist auch das Problem der Verschiebung von den äquatorialen Rändern der subtropischen Trocken-zonen. Während PENCK (1913) zunächst eine allgemeine Verschiebung der ariden Gebiete zum Äquator, d. h. eine Einengung der humiden Tropenzone feststellte, ergaben die Untersuchungen von WISSMANN in China, JAEGER in Mexiko, TROLL in den bolivianischen Anden u. a. sowie die Arbeiten von KLUTE (1930) und WUNDT (1938), dass in der Eiszeit »nicht die regenreichen Tropen eingengt waren, sondern die Wüstengürtel an ihren Flanken« (PENCK, 1936).

Eine jeder Kritik standhaltende Deutung dieser Beobachtungen aus dem Tropengürtel bezüglich der Zirkulationsverhältnisse ist leider nur schwer zu geben. Zunächst kann wohl als gesichert angesehen werden, dass die tropischen Pluvialperioden nicht allein durch eine Verringerung der Verdunstung infolge der allgemeinen Temperaturabnahme, sondern auch durch eine Vermehrung der Niederschläge zu erklären sind. In Ostafrika hängen die Niederschlagsverhältnisse in hohem Masse von der Lage des Druckmaximums im Südindik und von der Intensität des SE-Passates im Südwinter ab. Durch eine Verstärkung dieser Strömung in den Glazialzeiten infolge (geringer) Nordwärtsverlagerung der im Südindik gelegenen Hochdruckzelle und der — wohl in Übereinstimmung mit WUNDT (1938) als Folge der ausgedehnten nordhemisphärischen Eisbedeckung als gesichert zu betrachtenden — südlicheren Lage des thermischen Äquators können die sommerlichen Niederschläge im ostafrikanischen Raum erhöht worden sein, während im Winter die allgemeine Verminderung der Verdunstung ihren Teil zur Erhaltung der hohen Wasserstände der dortigen Seen beitrug. — Die Beobachtungen aus Indien deuten zweifellos auf eine Verstärkung des Sommermonsuns, deren Ursache möglicherweise ebenfalls in der erwähnten Intensivierung des SE-Passates, der im Bereich des Äquators nach NE umbiegt, gesucht werden kann. Andererseits muss aber auch ein sehr kräftiger Wintermonsun in diesen Gebieten vorhanden gewesen sein,

da in den Glazialepochen das sibirische Kältemaximum zweifellos kräftiger ausgebildet war als heute (VIETE 1949).

Diese kurzen Ausführungen zeigen bereits, dass genauere Aussagen über die Strömungsverhältnisse in den niederen Breiten erst nach einer wesentlichen Erweiterung des Beobachtungsmaterials möglich sind. Sie machen wahrscheinlich, dass im Bereich des nördlichen Indik sowohl die Monsunzirkulation als auch der planetarische Kreislauf verstärkt waren. Für eine allgemein grössere Intensität der tropischen Zirkulation als beste Verwirklichung einer thermisch angeregten Meridionalzirkulation sprechen ausserdem:

1. der durch die Ausdehnung der Eisbedeckung vor allem auf der Nordhalbkugel vergrösserte Temperaturgradient zwischen den Tropen und den gemässigten Breiten,
2. die erwähnte Verschiebung der äquatorialen Trockengrenzen und
3. die in der Gegenwart beobachtete Erscheinung, dass sich Änderungen in der aussertropischen Zirkulation auf den Passatkreislauf und umgekehrt übertragen.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre während einer Glazialepoche infolge der grösseren Eisbedeckung in allen Teilen verstärkt und der aussertropische Kreislauf besonders auf der Nordhalbkugel äquatorwärts ausgedehnt waren. Es ist sehr wahrscheinlich, dass damals wegen der starken nordhemisphärischen Vereisung nicht wie heute die südliche Zirkulation über den Äquator nach Norden übergriff, sondern eher umgekehrte Verhältnisse geherrscht haben.

2. Atmosphärische Zirkulation und Eiszeitursachen

Die auf Grund zahlreicher Zeugnisse der Diluvialgeologie und des diluvialen Klimas abgeleitete Verstärkung der allgemeinen Zirkulation während der Glazialperioden gegenüber der Jetztzeit steht, worauf bereits des öfteren hingewiesen worden ist, im Widerspruch zu den in der jüngsten Vergangenheit beobachteten Zusammenhängen zwischen Zirkulations-, Klima- und Gletscherschwankungen.

Nach den Untersuchungen von WAGNER (1929) und SCHERHAG (1936, 1939) hat be-

kanntlich seit etwa 1850 eine zunehmende Verstärkung der atmosphärischen Zirkulation stattgefunden. Von den damit verbundenen Klimaänderungen und sonstigen Erscheinungen sind hier besonders zu erwähnen:

1. Erniedrigung der Sommer- und Erhöhung der Wintertemperaturen, d. h. Abschwächung der jährlichen Temperaturschwankungen in Mittel- und Nord-europa;
2. Vermehrung der Niederschläge im gleichen Raum mit Ausnahme eines Gebietes zwischen Grönland-Mittelengland-Bottnischer Meerbusen-Nordkap und
3. Verminderung der Niederschläge in den Rossbreiten;
4. Nordwärts-Verlagerung des Azoren-Maximums,
5. zunehmende Austrocknungserscheinungen am polaren Rand des nördlichen Trockengürtels,
6. Rückgang der Gletscher fast aller Hochgebirge,
7. starker Rückgang der arktischen Eisbedeckung.

Demgegenüber waren in den Vereisungszeiten bei verstärkter Zirkulation die Temperaturen erniedrigt, das Azorenhoch eher südwärts als nach Norden verlagert, die polaren Ränder der Wüstengürtel feuchter als heute, und vor allem war die Schneegrenze um 500—1 500 m gegenüber der Jetztzeit gesenkt, die Landgebiete der mittleren und hohen Breiten waren vereist und sämtliche Hochgebirge weitaus stärker vergletschert als heute.

Zu diesen Widersprüchen muss festgestellt werden, dass ein Vergleich zwischen der oben abgeleiteten glazialen und der gegenwärtigen Zirkulationsverstärkung aus kausalen Gründen überhaupt nicht möglich ist. Die eiszeitliche Intensivierung des Luftkreislaufes wurde festgestellt auf Grund der »beobachteten« Verhältnisse während eines Eishöchststandes. Sie ist erst eine Folge der zunehmenden Ausdehnung der Eisgebiete in den mittleren Breiten, d. h. eine durch terrestrische Einflüsse sekundäre Veränderung der ursprünglichen Zirkulation. Dagegen wurde die Zirkulationsschwankung der Gegenwart sehr wahrscheinlich durch extraterrestrische Vorgänge (n. WAGNER durch

eine Vermehrung der solaren Einstrahlung) ausgelöst.

Mit der Frage, welche Zirkulationsverhältnisse in der primären Phase einer Glazialperiode herrschten, kommt man notwendigerweise zum Problem der Vereisungsursachen. Die erwähnten Beobachtungen der Gegenwart zeigen eindeutig, dass eine gegen heute verstärkte Zirkulation weder als direkte noch als mittelbare Ursache der Vereisungen betrachtet werden kann. Man muss im Gegenteil feststellen, dass derartige Verhältnisse durch den vermehrten Wärmetransport in die höheren Breiten vereisungsfeindlich sind.

Leider ist es bisher nicht gelungen, die ursächlichen Zusammenhänge zwischen Gletscher- und Klimaschwankungen einwandfrei zu ermitteln. Die von KÖPPEN-WEGENER (1924) in Verbindung mit der astronomischen Theorie der Eiszeiten eingeführte Vorstellung, dass ein ozeanisches Klima mit erhöhten Niederschlägen und verringerter jährlicher Temperaturamplitude eine Zunahme der Vergletscherung begünstige, erscheint zwar durchaus einleuchtend, steht jedoch im Widerspruch mit den Erfahrungen der jüngsten Vergangenheit. WAGNER nimmt daher an, dass die Gletscherbewegungen in erster Linie an die mittleren Jahrestemperaturen gebunden sind, die offenbar auf der ganzen Erde seit etwa 1800 zunehmen.

Wenn somit die gegenwärtigen Beobachtungen zeigen, dass eine Verstärkung des Luftkreislaufes mit Gletscherrückgang verbunden ist, so muss daraus gefolgert werden, dass in den jeweiligen Zeiten des Beginns eines Eisvorstosses die Zirkulation relativ zur Gegenwart abgeschwächt, d. h. der Luftaustausch zwischen den hohen und subtropischen Breiten vermindert war. Schwache Zirkulation bedeutet aber nach den Untersuchungen von DEFANT, SCHERHAG, SCHEDLER u. a.: Häufung kalter Winter in hohen und mittleren Breiten und Verlagerung vor allem der winterlichen Zyklontätigkeit auf die südlicheren Bahnen. Damit wird die Frage nach der zur Vereisung der grossen Landgebiete in den hohen und mittleren Breiten erforderlichen kräftigen Feuchtezufuhr problematisch. Eine Klärung dieser Widersprüche ist nur unter Berücksichtigung der geographischen Verhältnisse der vergletschernden Gebiete möglich. Es soll nun versucht werden, die Mitwirkung und Bedeu-

tung der allgemeinen Zirkulation bei der Entstehung der diluvialen Eisgebiete kurz zu skizzieren, wobei als Ausgangszustand (z. B. Riss-Würm-Interglazial) bezüglich der Land-See-Verteilung, Orographie und polaren Eisbedeckung etwa die heutigen Verhältnisse angenommen werden.

a. *Europäischer Eisschild*. Bei der Rekonstruktion der Vergletscherung Nordeuropas treten die soeben erwähnten Fragen besonders deutlich in Erscheinung. Nach den in der Gegenwart beobachteten Zusammenhängen zwischen Gletscherausdehnung und Zirkulation kann die Bildung der skandinavischen Vereisung nur bei einem im Vergleich zur Jetztzeit geschwächten Luftkreislauf begonnen haben:

Die geringe Wärmeadvektion in die hohen Breiten musste dabei zunächst zu einer Erniedrigung der Temperaturen im Nordpolarbecken und schliesslich zu einer Ausdehnung der arktischen Meereisbedeckung möglicherweise bis nahe an die nordeuropäische Küste führen. Im nordskandinavischen Hochgebirge wurde zunächst die infolge schwacher Zirkulation bewirkte Abkühlung durch die Kältewirkung der vergrösserten Polareiskappe verstärkt und damit eine Senkung der Schneegrenze bewirkt. Gleichzeitig erfolgte aber auch eine Verschärfung der meridionalen Temperaturgegensätze im nordatlantischen Raum. Der Gleichgewichtszustand zwischen Temperaturverteilung und Zirkulation wurde gestört, und unter langsame Schwankungen — ähnlich den von DEFANT (1924) untersuchten Zirkulationsschwankungen infolge vulkanischer Lockerausbrüche — fand eine Intensivierung des Luftaustausches statt. Damit wurde zwar die Zyklontätigkeit in den nördlichen Breiten verstärkt, durch vermehrte Wärmeadvektion aber die Schneegrenze wieder gehoben und die Packeisgrenze zurückgedrängt. Diese Schwierigkeit verschwindet jedoch, wenn man bedenkt, dass die diluviale Klimaverschlechterung nach allen vorliegenden Zeugnissen eine weltweite Erscheinung war, die (ohne Eiswirkung) eine generelle primäre Temperaturabnahme auf der Erde von mindesten 4°—7° C zur Folge hatte. Dieser Temperaturrückgang unterstützte den gesamten dargestellten Vorgang, so dass die oben erwähnte Zirkula-

tionsverstärkung in ihrer erwärmenden Wirkung für die hohen Breiten sicher nur wenig in Erscheinung trat, aber doch die Feuchtezufuhr nach Nordeuropa vermehrte und ein Anwachsen der skandinavischen Gletscher ermöglichte.

Der wesentlichste Punkt bei der Entwicklung einer stärkeren Vergletscherung des skandinavischen Hochgebirges ist somit das Zusammentreffen von drei Abkühlungsursachen: 1. genereller Temperaturrückgang auf der Erde, 2. Temperaturerniedrigung durch verminderte Zirkulation im Nordpolarbecken, 3. Kältewirkung der vergrößerten polaren Eiskappe.

Für die weitere Entwicklung der Gletscher- und Eisausbreitung wird der zuerst von BROOKS (1925) herangezogene und später von KLUTE, BEHRMANN und WUNDT hervorgehobene Vorgang der Selbstverstärkung einer Eiskappe der ausschlaggebende Faktor gewesen sein. Je weiter südwärts die Eismassen vordrangen, desto kräftiger wurde die Zirkulation, bis die Wärmezufuhr aus den niederen Breiten gemeinsam mit den strahlungsbedingten Temperaturverhältnissen im Eisrandgebiet die Kältewirkung des Eises kompensierten und damit eine Stillstands- bzw. Endlage der Gletscherausdehnung erreicht war. Man darf jedoch weder die Ausbreitung des Eises als einen absolut stetigen Vorgang noch die Endlage als einen absoluten Ruhezustand ansehen. Der Eisrand führte vielmehr ständige Pendelbewegungen aus, deren Ursachen (mit entsprechender Verzögerung) wahrscheinlich in langperiodischen Zirkulationsschwankungen ähnlich den in historischer Zeit stattgefundenen zu suchen sind.

b. *Nordamerikanische Vereisung.* In Nordamerika bestanden während der Diluvialzeit drei Eiszentren — Kordillerevereisung, Keewatin- und Labradoreisschild —, deren maximale Ausdehnung nicht gleichzeitig, sondern nacheinander, offenbar von West nach Ost fortschreitend, erfolgte (COLEMAN, LEVERETT, ANTEVS). Die Lage der beiden letztgenannten Zentren im Innern bzw. an der Ostküste der nordamerikanischen Landmasse lässt erkennen, dass das für die skandinavische Vereisung entworfene Bildungsschema hier nicht einfach übertragen werden kann. Nur die Kordillerevereisung als ältester Eisschild weist

eine ähnliche geographische Lage auf wie der nordeuropäische, allerdings fehlt auch hier die direkte Berührung mit dem arktischen Becken. Sie findet die einfachste Erklärung:

Der allmähliche Temperaturrückgang im Pliozän bewirkte ein Absinken der Schneegrenze, wobei die Gletscherausdehnung noch begünstigt wurde durch die damals wahrscheinlich gegenüber der Jetztzeit weiter nordwärts gelegene Hauptzugstrasse der Depressionen (BROOKS 1924).

Nachdem die Kordillerevereisung ihr Maximum bereits überschritten hatte, entwickelte sich der Keewatineisschild in dem westlich der Hudsonbay gelegenen Tiefland (300—500 m NN), welches sich heute durch ein exzessives Kontinentalklima mit nur 300—350 mm Jahresniederschlag auszeichnet. Zur Bildung dieses Eisgebietes musste die Schneegrenze erheblich abgesunken sein. Es war also eine starke Temperaturerniedrigung (Kältewirkung des angrenzenden Kordillereises) und eine gegen heute vermehrte Feuchtezufuhr, d. h. eine Verstärkung der Zyklontätigkeit auf südlicheren Bahnen, erforderlich.

Wahrscheinlich wird diese Zirkulationsverstärkung bereits ein sekundärer Vorgang, eine Folge der zunehmenden Eisbedeckung des arktischen Archipels und der damit verbundenen Südwärtsverlagerung der Zyklonenbahnen gewesen sein. Dabei musste, in Übereinstimmung mit den Beobachtungen, die Kordillerevereisung im nördlichen Teil wegen der abnehmenden Feuchtezufuhr und im küstennahen Raum infolge des vermehrten Wärmetransportes allmählich zurückgehen. Die niederschlagsbringenden Winde werden zunächst vorwiegend aus westlicher Richtung (ENQUIST, ANTEVS), später jedoch auch von der atlantischen Seite gekommen sein.

Das Labradorzentrum bildete sich wenig nach dem Keewatineis. Seine Mächtigkeit betrug im Mittel nur 300—500 m, und grosse Teile Neufundlands sowie des Torngate-Tafellandes blieben völlig eisfrei. Das deutet offenbar auf eine gegenüber den anderen Zentren schlechtere Ernährung dieses Eisgebietes. Trotzdem muss die Feuchtezufuhr damals grösser gewesen sein als heute (400—800 mm Jahresniederschlag). Wie bereits ENQUIST hervorgehoben hat, müssen die Schneewinde aus dem östlichen Quadranten, d. h. von der

Rückseite der südwärts verlagerten nordatlantischen Depression, vom Nordatlantik gekommen sein.

Die Labradorvereisung stellt also eine sekundäre Bildung bei stark erniedrigten Temperaturen (allgemeiner Temperaturrückgang und Kältewirkung des Keewatineises) nach erfolgter Zirkulationsverstärkung dar. Letzteres stimmt gut mit den Beobachtungen aus der Gegenwart überein, wonach in Labrador im Laufe der letzten 30—40 Jahre die jährliche Niederschlagsmenge und die Wintertemperaturen zugenommen, die Jahrestemperaturen jedoch abgenommen haben.

Überblickt man die nordamerikanische Vereisung in ihrer Gesamtheit, so ergibt sich der gleiche Entstehungsvorgang wie bei der Vergletscherung Skandiaviens: 1. Auslösung der Vereisung als Folge eines allgemeinen Temperaturrückganges und verminderter Zirkulation; 2. Weitere Ausbreitung des Inlandeises, d. h. Bildung des Keewatin- und Labradorzentrums, durch zusätzliche Abkühlung (Kältewirkung des Eises) bei Intensivierung des allgemeinen Luftkreislaufes.

c. *Nordasiatische Vereisung.* Über die zur Bildung der nordasiatischen Eisgebiete erforderlichen atmosphärischen Verhältnisse sind nur allgemeine Aussagen möglich, weil die zeitliche Stellung der einzelnen Vereisungszentren und ihre Ausdehnung noch nicht genügend geklärt sind. Da es sich hier grösstenteils um Gebiete eines gegenwärtig polaren innerkontinentalen Trockenklimas handelt, muss neben dem primären Temperaturrückgang — der zur Vereisung des Nordpolarbeckens bis an die nordsibirische Küste führte und der Kältewirkung dieser polaren Eiskappe die Feuchtezufuhr verstärkt gewesen sein. Dabei konnten die schneebringenden Luftströmungen nur aus west- bis südwestlicher Richtung, d. h. aus dem nordatlantischen Verdunstungsgebiet kommen. Die Bildung der nordasiatischen Eisgebiete konnte demnach erst in der sekundären Phase der nordeuropäischen Vergletscherung bei verstärkter Zirkulation (weites Vordringen der über das Mittelmeer-Schwarzmeer nach Nordosten ziehenden Depressionen) erfolgen.

d. *Antarktika.* Die Vereisung des Südpolarcontinentes ist wohl das schwierigste Problem der gesamten Glazialforschung, da die rezente

Eiskappe nahezu sämtliche vorpleistozänen Ablagerungen bedeckt und keine Aussagen über den Zeitpunkt des Vereisungsbeginnes zulässt. Die im antarktischen Randgebiet (Umgebung vom Grahamland) gefundenen tertiären Floren lassen ähnlich wie auf der Nordhemisphäre einen zunehmenden Temperaturrückgang im Laufe des Neogen erkennen. Die pliozäne Steppen- und Tundrenflora der Cockburn-Insel lässt sogar eine mindestens den zentralen Teil von Antarktika bedeckende Vereisung vermuten. Aussagen über die zur Bildung des Inlandeises erforderlichen meteorologischen Verhältnisse sind jedoch nicht möglich, zumal auch die Landverteilung im Bereich des spättertiären Südpolarcontinentes unbekannt ist.¹

Demgegenüber konnte die an mehreren Stellen von Antarktika beobachtete grössere Mächtigkeit der Eisbedeckung in jüngerer geologischer Vergangenheit durch MEINARDUS (1928) befriedigend erklärt werden: Ein Eiszuwachs im Gebiet des südpolaren Inlandeises ist nur durch eine vermehrte Feuchtezufuhr möglich. Eine Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Luft konnte aber in den Glazialzeiten nur durch vermehrte Verdunstung infolge Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit in der südlichen Westwinddrift, d. h. durch Intensivierung der allgemeinen Zirkulation, erfolgen. — Auch hier ist die zeitliche Einordnung des Eishöchststandes noch problematisch, so dass eine Parallelisierung mit den nordhemisphärischen Verhältnissen nur eine reine Vermutung darstellen würde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass — soweit zuverlässige Aussagen möglich sind (vor allem im nordeuropäischen Eisgebiet und bei der nordamerikanischen Vereisung) — die atmosphärischen Verhältnisse in der primären Phase einer Glazialzeit bzw. des Diluviums ausgezeichnet waren durch

1. einen allgemeinen Temperaturrückgang auf der Erde,
2. gegenüber der Jetztzeit verminderte Zirkulation und
3. eine zusätzliche Abkühlung durch die Eisbedeckung des Nordpolarbeckens (gilt nur für die Nordhemisphäre).

¹ Die Diskussion der vorhandenen Möglichkeiten muss einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben.

3. Eiszeittheorien und Zirkulation

Der nächste Schritt ist eine Untersuchung der zur Erklärung der diluvialen Klimaschwankungen aufgestellten Theorien hinsichtlich des mindestens für die Nordhalbkugel gültigen Kriteriums, dass zur Auslösung eines Eisvorstosses eine allgemeine Temperaturabnahme und eine gegen heute geschwächte Zirkulation erforderlich ist. Da es müssig wäre, sämtliche, bisher aufgestellte Eiszeittheorien zu besprechen, sollen nur die wichtigsten Punkte der 4 gegenwärtig zur Diskussion stehenden Gruppen (solare — kosmische — geographische — astronomische Theorie), deren Grundlagen vorausgesetzt werden müssen, behandelt werden.

A. *Solare Ursachen.* Der nächstliegende und daher wohl älteste Versuch zur Deutung des Eiszeitphänomens ist die Annahme einer Verminderung der solaren Strahlungsenergie, wodurch zunächst der allgemeine Temperaturrückgang auf der Erde erklärt wird. Damit muss aber gleichzeitig auch die Intensität der atmosphärischen Zirkulation geschwächt worden sein, denn die Berechnungen der Veränderung des zonalen Wärmegefälles bei einer Änderung der Solarkonstanten durch ZENKER, LIZNAR und HOPFNER (Zusammenfassung bei KERNER (1940) zeigen trotz zahlenmässiger Unterschiede prinzipiell das gleiche Ergebnis: Die äquatorialen Gebiete werden von der Strahlungsänderung stets stärker betroffen als die höheren Breiten. Bei einer Verminderung der Zustrahlung werden also die meridionalen Bestrahlungsdifferenzen geschwächt und damit die Zirkulation vermindert. Der Vorgang wird zwar durch sekundäre Veränderungen noch etwas kompliziert (Verringerung der Verdunstung und Bewölkungsrückgang in den Tropen und gemässigten Breiten; in den Subtropen durch Schwächung der Absinkbewegungen Bewölkungszunahme) es muss sich aber schliesslich ein Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Temperaturverteilung einstellen, bei dem gegenüber der vorangegangenen Zeit die Temperaturen erniedrigt sind und der meridionale Luftaustausch geschwächt ist.

Zum gleichen Ergebnis führt die von DEFANT (1921) aufgestellte Differentialgleichung über den Zusammenhang von Einstrahlung (E), Ausstrahlung (A), Luftzirkulation (Z) und Temperatur (T):

1. $E + = Z +, T +$
2. $E - = Z -, T -$
3. $A + = Z +, T -$
4. $A - = Z -, T +$

In der primären Vereisungsphase wäre danach der Vorgang 2 anzusetzen, in der sekundären — durch die von WUNDT (1938a) infolge verstärkter Strahlungsreflexion des Eises abgeleitete Erhöhung der Erdalbedo um etwa 4 % — dagegen Vorgang 3.

Die Annahme einer Verminderung der solaren Zustrahlung, deren Gründe hier nicht zur Diskussion stehen, führt also zu den zur Einleitung einer Vereisungsphase nötigen Bedingungen. Demgegenüber hat C. G. SIMPSON (1934) versucht, nachzuweisen, dass auch bei Verstärkung der Sonnenstrahlung ein Eisvorstoss in den höheren Breiten möglich sei.

Nach dieser Theorie fand im Diluvium eine zweimalige Verstärkung und Abschwächung der solaren Strahlungsintensität statt, wobei in den Zeiten zunehmender und abnehmender Strahlung Eisvorstösse — entsprechend den 4 Glazialperioden — ausgelöst wurden, während die Zeiten maximaler und minimaler Strahlung eisfrei, d. h. Interglaziale, waren. Daraus folgt, dass sich die Glaziale 1 und 3 in Zeiten zunehmender, die Glaziale 2 und 4 dagegen bei abnehmender Intensität der Zirkulation entwickelten. Von den Interglazialen waren das erste und dritte (Strahlungsmaxima) warm-feucht mit sehr kräftiger Zirkulation, das zweite und die Gegenwart dagegen kalt-trocken mit schwachem Luftaustausch.

Zu den zahlreichen von geologischer und meteorologischer Seite vorgebrachten Einwänden gegen die Simpson'sche Theorie (WAGNER, KÖPPEN, BROOKS) sei im Rahmen des vorliegenden Themas noch hinzugefügt:

1. Die Entstehung der Eisvorstösse 1 und 3 bei (primär) verstärkter Zirkulation steht in krassem Widerspruch zu den in der Gegenwart gemachten Beobachtungen.
2. Die nordafrikanischen Pluviale werden in die warm-feuchten Interglaziale verlegt. Da in diesen Zeiten die Zirkulation kräftig entwickelt gewesen sein muss, ist nicht einzusehen, wie die verstärkte Niederschlagstätigkeit im Mittelmeergebiet zustande kommen konnte. (Azorenmaximum nordwärts verlagert, Depressionen bevorzugen nördliche Zugstrassen!)

Zusammenfassend muss man feststellen, dass der Theorie von SIMPSON wenig Wahrscheinlichkeit zukommt, obwohl manche Einzelheiten, z. B. die sekundären Wirkungen der veränderten hydrometeorischen Verhältnisse, wertvolle neue Gesichtspunkte im allgemeinen Eiszeitproblem eröffneten.

B. *Kosmische Ursachen.* Von den Theorien, die kosmische Ursachen zur Erklärung des eiszeitlichen Temperaturrückganges heranziehen, ist nur die Anschauung von HIMPEL (1947) bedeutsam. Ihre Erörterung erübrigt sich jedoch, da sie im wesentlichen nur die im Diluvium mehrfach erfolgten Schwächungen der solaren Strahlungsenergie zu erklären sucht und sich daher bezüglich der irdischen Temperatur- und Zirkulationsverhältnisse keine neuen Gesichtspunkte ergeben.

C. *Geographische Ursachen.* In der Gruppe der geographischen Theorien wird versucht, die diluvialen Klimaänderungen allein durch Veränderung der geographischen Verhältnisse (Land-Meer-Verteilung, Orographie usw.) ohne Strahlungsänderungen zu erklären. Es gilt somit zu untersuchen, ob die unmittelbar prädiluvialen Veränderungen des Reliefs der Erdoberfläche ausreichen, um über die dadurch erzeugten Änderungen der Zirkulation und des Klimas die Vereisungen auszulösen.

Hierbei sind die Untersuchungen von BROOKS (1925) und KERNER (1932) über die Frage des akryogenen Polarklimas von wesentlicher Bedeutung. Unter gegenwärtigen Strahlungsverhältnissen ist ein eisfreies Nordpolarmeer nur bei kräftigem meridionalen Wärmeaustausch (Vorhandensein mehrerer breiter Meeresverbindungen mit den tropischen Warmwassergebieten) und starker Wellenbewegung der Wasseroberfläche im Polarbecken möglich. Die allgemeine Zirkulation muss also kräftig entwickelt sein. Sobald dieser Luftaustausch infolge von Veränderungen der Land-Meer-Verteilung (z. B. Abschliessung des Nordpolarbeckens durch ausgedehnte zirkumpolare Landgebiete) vermindert oder behindert wird, sinkt die Temperatur im Polarbecken unter den für das akryogene Secklima kritischen Wert, es bildet sich eine polare Meereis-kappe, die durch ihre Kältewirkung zur weiteren Abkühlung der umgebenden Landgebiete beiträgt (Selbstverstärkung usw).

Die zahlreichen Funde wärmeliebender, z. T. subtropischer Pflanzen aus dem Alttertiär Grönlands und Spitzbergens machen mindestens für das Eozän das Vorhandensein eines weitgehend eisfreien Nordpolarbeckens wahrscheinlich. Vergleicht man die paläogeographische Karte des Eozän von MATTHEW (3 breite meridionale Meeresverbindungen im Gebiet des Nordatlantik, der Beringstrasse und zwischen Ural und Ob) mit der Karte des Pliozän von KOKEN-ARLDT (Abschnürung des Nordpolarmeeres), so treten die von BROOKS und KERNER geforderten Verhältnisse deutlich in Erscheinung.

Obwohl derartige Vergleiche bei der Unsicherheit paläogeographischer Rekonstruktionen nur mit Vorbehalt angewendet werden dürfen, kann man es doch als gesichert ansehen, dass zu Beginn des Diluviums die Landverteilung in den hohen Breiten etwa der heutigen entsprach. Zudem weist die Floren- und Faunenentwicklung im Neogen eindeutig auf eine zunehmende Abkühlung in den mittleren und hohen Nordbreiten.

Die angegebenen Veränderungen der nordhemisphärischen Festlands-konfiguration könnten somit die für den Beginn der Vereisung erforderlichen meteorologischen Voraussetzungen (Abschwächung der allgemeinen Zirkulation) geschaffen haben, wobei sie durch die im Rahmen der tektonischen Phasen erfolgten Gebirgsbildungen und Hebungen unterstützt wurden. — Das Kernproblem bilden dabei die Verhältnisse im nordatlantischen Raum, wo die infolge der verstärkten Vereisung des Nordpolarmeeres sekundär verstärkte Zirkulation der weiteren Eisausdehnung entgegenwirkte. Es fehlt hier die oben erwähnte dritte Komponente der Temperaturniedrigung. Nimmt man mit BUBNOFF, JESSEN, KERNER, QUIRING u. a. die Existenz der durch prädiluviale Hebung entstandenen Island—Färöer—Schwelle an, so ist das Problem zunächst gelöst, da auf diese Weise der Skandik und das Nordpolarbecken von der warmen nordatlantischen Drift abgesperrt wurden. Zur Erklärung der vier diluvialen Vereisungsperioden muss dann aber ein viermaliges Heben und Senken dieser Schwelle angenommen werden, was zweifellos recht unwahrscheinlich ist (BEHRMANN 1948).

Einen Versuch des Ausgleiches unternimmt WUNDT (1944), indem er nur eine Behinderung (nicht völlig Absperrung) des Golfstromes durch eine zwar gegen heute höhere, aber noch untermeerische Islandbarre annimmt.

Man muss somit zu dem Ergebnis kommen, dass die stattgefundenen geographischen Veränderungen zweifellos massgeblich am Zustandekommen der für die Vereisungen erforderlichen meteorologischen Verhältnisse beigetragen haben, dass sie aber nicht als alleinige Ursache der Glazialperioden angesehen werden können.

D. *Astronomische Theorie*. Bei der astronomischen Theorie der Eiszeiten werden die klimatischen Wirkungen der durch die Schwankungen der Erdbahnelemente ausgelösten Änderungen der solaren Bestrahlungsverhältnisse als Hauptfaktoren für die Entstehung der Vereisungen herangezogen.¹ Die sich hier ergebenden meteorologischen Verhältnisse sind wohl am besten von WUNDT (1944) dargestellt worden.

Die Grundlage für die Parallelisierung von Strahlungsschwankungen und Glazialperioden bildet die Annahme von KÖPPEN und WEGENER (1924), dass milde Winter (kräftige Zyklontätigkeit, starke Schneefälle in mittleren und hohen Breiten) und vor allem kühle Sommer (geringe Ablation), d. h. ein allgemein ozeanisches Klima vereisungsgünstig sind. Dementsprechend wurden die Glazialperioden mit den Zeitabschnitten geringer sommerlicher Bestrahlung bzw. geringer jahreszeitlicher Bestrahlungsdifferenzen identifiziert (Steillage der Erdachse, Perihellage im Winter bei starker Excentrizität der Erdbahn). Durch die gleiche Kombination der Bahnelemente, welche die jahreszeitlichen Unterschiede schwächt, werden aber die meridionalen Differenzen verstärkt, woraus folgt, dass — sofern die Änderung der meridionalen Bestrahlungsunterschiede eine gleichsinnige Veränderung der allgemeinen Zirkulation zur Folge hat — die primären Phasen der Glazialperioden an Zeiten verstärkter Zirkulation gebunden waren.

¹ Es wird im folgenden nur die von MILANKOVITCH entwickelte Theorie behandelt. Die von SPITALER ausgearbeitete Fassung muss wegen der klimatologisch unhaltbaren Definition der mittleren Bestrahlung eines Breitenkreises abgelehnt werden.

Zu diesen hier kurz skizzierten Zusammenhängen ist folgendes festzustellen:

1. Wie bereits erwähnt, ist es noch unentschieden, ob kalte Sommer und eine Verminderung der jährlichen Temperaturschwankung die Gletscherausbreitung begünstigen.
2. Kühle Sommer sind in Nordeuropa nach den Erfahrungen an schwache Zirkulation, d. h. geringe Zyklontätigkeit, geringe Ausdehnung des Azorenhochs und Verarmung der nördlichen Zugstrassen, gebunden.
3. Die gegenwärtigen Zirkulationsschwankungen und ihre Folgen bezüglich der Gletscherbewegung und Vereisung des Nordpolarmeeres stehen im offenen Widerspruch zu der Zirkulationsverstärkung nach der astronomischen Theorie.

Zur genaueren Untersuchung des letztgenannten Punktes wurden nach den Strahlungstabellen von MILANKOVITCH (1930) die Bestrahlungsdifferenzen zwischen 35° und 65° sowie zwischen 25° und 75° Breite jeweils für die als Hauptglazial- und Interglazialperioden bezeichneten Jahre bestimmt und mit den entsprechenden Werten der Gegenwart verglichen. Unter der bereits erwähnten Voraussetzung des Zusammenhanges zwischen Strahlungsgefälle und Luftkreislauf ergaben sich relativ zur Gegenwart folgende Zirkulationsänderungen:

1. Glazialzeiten der Nordhalbkugel:

Zirkulation im Nordsommer	+
Nordwinter	+
Zirkulation im Südsommer	+
Südwinter	—
2. Interglazialzeiten der Nordhalbkugel:

Zirkulation im Nordsommer	+
Nordwinter	—
Zirkulation im Südsommer	—
Südwinter	+

Die Zusammenstellung zeigt, dass nach der astronomischen Theorie während der nordhemisphärischen Glaziale sowohl die Sommer- als auch die Winterzirkulation (primäre Änderungen!) verstärkt waren, was nicht als vereisungsgünstig angesehen werden kann. Demgegenüber sind die Zirkulationsverhältnisse in den Interglazialen eher zutreffend, da für die hohen Breiten schwacher Austausch im Winter geringere Schneezufuhr und kräf-

tiger sommerlicher Austausch starke Ablation zur Folge haben.

Die aufgezeigten Schwierigkeiten hinsichtlich der primären Intensivierung des atmosphärischen Kreislaufs in den Glazialperioden hat WUNDT (1944) durch Kombination der astronomischen Theorie mit Reliefänderung zu lösen versucht: Die Hebung der Island—Färöer—Brücke gegen Ende des Tertiär versetzte die hohen Nordbreiten in einen Zustand der Vereisungsbereitschaft (primäre Abkühlung), während der zur Auslösung der Vereisungen erforderliche kritische Zustand durch die Bestrahlungsänderungen infolge Schwankungen der Erdbahnelemente (sommerliches Strahlungsminimum als zweite temperaturerniedrigende Komponente) erreicht bzw. überschritten wurde, wozu sich als dritter Faktor noch der Vorgang der Selbstverstärkung gesellte. Diese Verknüpfung zweier Ursachen kann als sehr brauchbar angesehen werden, denn bei entsprechend veränderten geographischen Verhältnissen können primäre Abkühlung und verstärkte, aber z. T. behinderte Zirkulation zweifellos vereisungsfördernd gewirkt haben. Andererseits wird die bei alleiniger Anwendung der Reliefveränderung als Eiszeitursache erforderliche mehrmalige Hebung und Senkung der Schwelle umgangen, da, sobald die geographischen Voraussetzungen vorhanden sind, die innere Struktur des Eiszeitalters durch die Schwankungen der Bahnelemente bestimmt wird.

Eine entsprechende Untersuchung der jahreszeitlichen Zirkulationsveränderungen auf der Südhalbkugel¹ ergab, dass zur Zeit der nordhemisphärischen Strahlungsminima (= Glaziale) im Süden der sommerliche Kreislauf verstärkt und der winterliche allgemein abgeschwächt war, während zur

Zeit der südlichen Strahlungsminima umgekehrte Verhältnisse geherrscht haben, wobei im Mittel die winterliche Intensivierung stärker war als die sommerliche Schwächung. Eine Deutung dieser Verhältnisse ist schwierig, zumal, wie erwähnt, Angaben über den Zeitpunkt des Beginns der antarktischen Vereisung und die dabei vorhandenen geographischen Bedingungen fehlen. Sofern der Südpolarkontinent bereits vereist war, konnte nach MEINARDUS (1937) nur eine Verstärkung der Zirkulation eine Zunahme der Eisbedeckung bewirken. Dabei wird jedoch m. E. eine sommerliche Verstärkung (Wasserdampfzufuhr) wirksamer gewesen sein als eine winterliche. Andererseits wird für die Bildung des in der Zone der Westdrift gelegenen patagonischen Inlandeises eine winterliche Intensivierung günstiger gewesen sein (verstärkter Schneefall).

Überblickt man abschliessend die vorangegangenen Erörterungen, so ergibt sich, dass ausser den solaren Theorien keine andere Hypothese allein in der Lage ist, die eiszeitlichen Verhältnisse zu erklären. Andererseits steht bei den ersteren noch immer die Frage nach der Ursache der wiederholten Verringerung der Solarkonstanten offen. Eine Ausnahme bildet hier die kosmische Theorie von HIMPEL, die recht gut fundiert erscheint, jedoch auch noch einiger astronomischer Untermauerung bedarf. Ganz allgemein muss festgestellt werden, dass es für den gegenwärtigen Stand der Eiszeitforschung wichtig ist, die in den verschiedenen Theorien dargelegten Gedanken zu kombinieren. Die von WUNDT durchgeführte Vereinigung von Reliefänderungen, Schwankungen der Erdbahnelemente und Selbstverstärkung war zweifellos recht fruchtbar. Nicht das dogmatische Festhalten an einer einmal aufgestellten Hypothese, sondern die Verbindung der Theorien untereinander zur möglichst vollständigen Erklärung aller eiszeitlichen Erscheinungen und ihre Anpassung an die sich ständig vermehrenden Erkenntnisse müssen das Ziel der heutigen Diluvialforschung sein.

¹ Die durch die Bahnelemente bewirkten Strahlungsschwankungen sind bekanntlich auf den beiden Hemisphären nicht genau synchron. Die im Mittel 8—11 Jahrtausende betragenden Zeitdifferenzen zwischen dem Eintritt der Strahlungsminima auf Nord- und Südhemisphäre dürften jedoch von MEINARDUS (Geol. Rdsch. 34 — 1944 — Klimaheft) befriedigend erklärt worden sein.

Literatur

- ALBRECHT, F., 1947: Die Aktionszentren des Wasser- und Wärmehaushaltes der Erdoberfläche. *Ztschr. f. Meteorol.* **91**, 97.
- BEHRMANN, W., 1948: Golfstrom und Eiszeit. *Peterm. Geogr. Mitt.* **92**, 154.
- BLÜTHGEN, J., 1942: Die diluviale Vereisung des Barentssecschelfes. *Naturwiss.* **31**.
- BROOKS, C. E. P., 1924: The Question of the Permanence of Cyclone Tracks. *Meteorol. Mag.* **59**.
- 1925: The problem of mild polar climates. *Quart. Journ. Roy. Met. Soc.* **51**, 83.
- BÜDEL, J., 1949: Die räumliche und zeitliche Gliederung des Eiszeitklimas. *Naturwissenschaften* **36**, 105 u. 133.
- DEFANT, A., 1921: Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemäßigten Breiten der Erde. *Geogr. Ann.* **3**, 209.
- 1924: Die Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation über dem nordatlantischen Ozean 1881—1905. *Geogr. Ann.* **6**.
- DE TERRA, H. u. PATERSON, T. T., 1939: Studies of the Ice Age in India. *Carnegie Inst. of Washington publ.* Nr. 493.
- DORSEY, H. G., 1945: Some meteorological aspects of the Greenland ice cap. *Journ. Meteorol.* **2**, 135.
- v. FICKER, H., 1933: Die eiszeitliche Vergletscherung der nordwestlichen Pamirgebiete. *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss. phys.-math. Kl.*
- FLOHN, H., 1947: Die mittlere Höhenlage der Tropopause über der Nordhalbkugel. *Meteorol. Rdsch.* **1**, 27.
- GEORGI, J., 1939: Das Klima des grönländischen Inlandeises. *Abh. Nat. Ver. Bremen* **31**, H. 2.
- HIMPEL, K., 1947: Ein Beitrag zum Eiszeitproblem. *Ztschr. f. Naturf.* **2 a**, 419.
- KERNER, F. v., 1932: Der heutige Stand des Problems der milden Polarklimate der Vorzeit. *Meteorol. Ztschr.* **39**, 186.
- 1940: Wie würde sich bei Änderung der Sonnenstrahlung das zonale Wärmegefälle ändern? *Meteorol. Ztschr.* **57**, 234.
- KLUTE, F., 1930: Die Verschiebung der Klimagebiete der letzten Eiszeit. *Peterm. Geogr. Mitt. Erg. H.* **209**.
- 1949: Rekonstruktion des Klimas der letzten Eiszeit in Mitteleuropa. *Geogr. Rdsch.* **1**, H. 3—4.
- KÖPPEN, W. u. WEGENER, A., 1924: Die Klimate der geologischen Vorzeit, Berlin.
- MEINARDUS, W., 1928: Der Wasserhaushalt der Antarktis in der Eiszeit. *Nachr. Ges. d. Wiss.* Göttingen.
- 1937: Allgemeine Zirkulation und Niederschlagsverteilung in der Eiszeit. *Meteorol. Ztschr.* **54**, 255.
- MILANKOVITCH, M., 1930: Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. *Hdb. d. Klimatol.* Bd. I, Teil A. Berlin.
- NILSSON, E., 1940: Ancient Changes of Climate in British East Africa and Abyssinia. *Geogr. Ann.* **22**, 1.
- PENCK, A., 1913: Die Formen der Landoberfläche und die Verschiebung der Klimagürtel. *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss.*
- 1937: Europa im Eiszeitalter. *Geogr. Ztschr.* **43**, 1.
- SCHERHAG, R., 1936: Die Zunahme der atmosphärischen Zirkulation in den letzten 25 Jahren. *Ann. d. Hydrogr. u. maritimen Meteorol.* **64**, 397.
- 1939: Die Erwärmung des nördlichen Polargebietes. (desgl.) **67**, 57.
- SIMPSON, C. G., 1934: World climate during the quaternary period. *Quart. Journ. Roy. Met. Soc.* **60**, 425.
- VIETE, G., 1949: Das Problem der allgemeinen Zirkulation im Diluvium (I). *Ztschr. f. Meteorol.* **3**, 65.
- WAGNER, A., 1929: Untersuchung der Schwankungen der allgemeinen Zirkulation. *Geogr. Ann.* **11**, 35.
- WUNDT, W., 1938 a: Das Reflexionsvermögen der Erde zur Eiszeit. *Meteorol. Ztschr.* **55**, 81.
- 1938 b: Die Verschiebung der Klimagürtel seit dem Ausgang der Eiszeit. *Peterm. Geogr. Mitt.* **84**, 332.
- 1943: Luftdruckgürtel, Niederschläge und Vereisungszentren im Quartär. *Meteorol. Ztschr.* **60**.
- 1944: Die Mitwirkung der Erdbahnelemente bei der Entstehung der Eiszeiten. *Geol. Rdsch.* **34**, 713.