

Terrassen sind breit entwickelt, aber schon deutlich zerschnitten. Sie sind lößbedeckt, tragen aber stets nur einen Löß, eben den einzigen Würmlöß, den es gibt. Hierzu gehört die breite „Talwegterrasse“ am Mittelrhein, im Alpenvorland die *Graulsche* „Jungriß“-Terrasse. *Penck* hat diesen morphologischen Komplex als „Riß“ bezeichnet. Ich schlage mit *Graul*²²⁾ und *Weidenbach* vor, diese eigene Kaltzeit weiterhin „Jungriß“ zu nennen, da sich inzwischen gezeigt hat, daß sie vom Komplex der früheren (mittleren und älteren) Rißablagerungen durch eine ähnlich große Warmzeit getrennt ist wie von der Würmkaltzeit.

Dieser Gliederung der Gletscherbildungen fügt sich diejenige der nichtglazialen Ablagerungen Mitteleuropas zwanglos ein. Es gibt nur einen Würm-Löß: denjenigen, der die Spuren des Aurignac-Menschen enthält, als einziger die Jungriß-Terrassen bedeckt und auf älteren Ablagerungen von der „Göttweiger Bodenbildung“ nach *Freising*²³⁾ unterlagert wird, d. h. dem Verwitterungshorizont der letzten Interglazialzeit. Der nächstältere Löß, über dem diese Göttweiger Bodenbildung entstand, entspricht der Jungriß-Eiszeit; die tiefere „Kremser Bodenbildung“ an seiner Basis, die die älteren Löße überdeckt, ist der Verwitterungshorizont des vorletzten Interglazials. In ähnlicher Weise lassen sich auch viele andere Eiszeitbildungen: paläontologische und prähistorische Stufen, Höhlen- und Meeressedimente ohne Beeinträchtigung ihres sachlichen Befundes dieser Gliederung einfügen. So rückt die große Wende der jungpleistozänen Faunenent-

wicklung jetzt vor die Jungriß-Eiszeit. Noch nicht ganz geklärt ist die Stellung der Eem-Ablagerungen in dieser Gliederung; vermutlich gehören sie ins vorletzte Interglazial.

Endlich zeigt Abb. 4, welche verschiedene Abschnitte dieser Gliederung einzelne Forscher als „Würm I“ bezeichnet haben. *Soergel* und *Grabmann* verwandten diesen Ausdruck für das Jungriß. Andere, so *Schaefer* verstehen darunter den ersten Abschnitt der eigentlichen Würmzeit (vom letzten Interglazial bis zu dem genannten hypothetischen Interstadial). Ähnliche Ansichten vertraten *Eberl* und *Knauer*, wobei sie jedoch diesem „Würm I“ auch bestimmte, bisher als Rückzugsstadien gedeutete Würmmoränen zuordneten. Wieder einen anderen Inhalt hat die erste Würmphase (Vorstoßzeit) nach *K. Richter*²⁴⁾: sie würde die ganze Würmzeit bis zum ersten Rückzug vom Brandenburger Stadium umfassen.

Demgegenüber wird vorgeschlagen:

1. die Bezeichnungen Würm I, Würm II usw. als überflüssig und irreführend künftig zu streichen,

2. für die vorletzte Kaltzeit den einmal eingeführten Namen „Jungriß“ beizubehalten,

3. der Würmkaltzeit nur den morphologisch klar umrissenen Komplex der jungpleistozänen Ablagerungen und sicher gleichaltriger Erscheinungen zuzuordnen. Dieser Komplex hebt sich in Mitteleuropa sowohl im glazigenen wie im nichtglazigenen Bereich deutlich von allen älteren Kaltzeitspuren ab. Darüber hinaus sind in weiten Teilen der übrigen Welt eben nur die klimatischen, bodenkundlichen, morphologischen und geologischen Spuren dieser letzten Kaltzeit deutlich faßbar.

²⁴⁾ *Richter, K.*: Klimatische Verschiedenheit glazialer Vorstoßphasen in Norddeutschland. Vortr. IV. Int. Quartärkonferenz, Rom 1953.

²²⁾ *Graul, H.*: Zur Gliederung der Würmeiszeit im Illergebiet. *Geologica Bavarica* 18, 1953, und zahlreiche frühere Arbeiten.

²³⁾ *Freising, H.*: Neue Ergebnisse der Lößforschung im nördlichen Württemberg. *Jh. Geol. Abt. württ. stat. L. A. 1*, 1951.

STUDIEN ÜBER DIE ATMOSPHERISCHE ZIRKULATION IN DER LETZTEN EISZEIT

Hermann Flohn

Mit 2 Abbildungen

Atmospheric circulation during the last glacial period

Summary: The discussion of the climate during the glacial period is now being considered from a meteorological aspect. Looking at the general air circulation during the initial stages and the climax of the glacial period we find that the "glacial anticyclones" played quantitatively a minor rôle. For the tropical and subtropical zones there is proof of a general decrease in temperature of about 4° C. The areas close to the ice experienced pronounced temperature inversions near the ground. It is possible to

give an approximate estimate of the average distribution of the winds, temperature and precipitation in Southern Germany during the glacial period. The total amount of evaporation (and consequently also of precipitation) was at least 20 per cent. less than today. The cause of the glacial periods may most likely be seen in changes of solar activity in single parts of the spectrum (as suggested by *Huntington* and *Willett*) since the actual climatic anomalies connected with these changes show the same distribution as those of the glacial period.

Die Intensivierung der Eiszeitforschung, wie sie im Laufe der letzten Jahre durch die Ausdehnung der Untersuchungen auf die klimatisch bedingte Morphologie und die Vegetationsgeschichte der nichtvereisten Gebiete, die eine großräumige Kartierung ermöglicht, in Gang gekommen ist, liefert neue Grundlagen für eine Betrachtung des Eiszeitproblems auch vom meteorologischen Gesichtspunkt aus. An dieser Diskussion haben sich in den letzten Jahren in fruchtbarer Weise eine Reihe von Meteorologen, wie *H. C. Willett* (USA), *H. Landsberg* (USA), *C. E. P. Brooks* (England) und andere beteiligt. Diese Diskussion geht aus von einem Vergleich der geologisch-morphologischen Ergebnisse mit den heutigen klimatischen Befunden, insbesondere mit den heute zu beobachtenden Klimaanomalien in dreidimensionaler Sicht, also im Sinne des Aktualitätsprinzips der Geologie. Diese Betrachtungsweise wurde angeregt durch das Erlebnis der strengen Winter 1939 bis 1942, mit langanhaltenden Höhentritten über Mitteleuropa, mit Kaltluftzufuhr über das Mittelmeer mit kräftigen Winterniederschlägen bis in den Sudan, zugleich mit außerordentlichen Schneemengen im westlichen und mittleren Europa und häufiger zyklonaler Tätigkeit vom Schwarzen Meer bis nach Mittelrußland hinein. Ähnlich wurden im Januar 1949 über dem sonst wüstenhaft trockenen Westen der Vereinigten Staaten (Utah: Lake Bonneville!) kräftige Niederschläge beobachtet im Zusammenhang mit einem intensiven Höhentrog mit Kaltlufterbrüchen, die sich vom kanadischen Zentrum aus nach Südwesten erstreckten und noch in Südkalifornien Schneefall brachten.

Diese Art der Betrachtung führt uns aus dem Bereich unfruchtbarer Hypothesen heraus auf einen festen Grund, von dem aus wir aufbauen können. Bei diesem nicht mehr deduktiven, sondern induktiven Vorgehen tritt allerdings eine Frage in den Hintergrund: das ist die nach den Ursachen dieser Zirkulationsanomalien und damit nach den Ursachen der Eiszeit; zu dieser müssen einige Hinweise zum Schluß genügen. Der Zweck dieser Zeilen ist eine Weiterführung der bereits (1) veröffentlichten paläoklimatischen Überlegungen für die letzte Eiszeit und eine Diskussion neuerer Veröffentlichungen. Dabei ist es nützlich, manche Punkte einmal mit plausiblen Annahmen quantitativ durchzurechnen, um wenigstens Größenordnung oder Vorzeichen einer Änderung sicherzustellen.

1. Die allgemeine Zirkulation zur Eiszeit

Die allgemeine Zirkulation zur Eiszeit war nach Ausweis der geologisch-morphologischen Befunde (2, 3, 4) charakterisiert durch eine Schrum-

pfung der subtropischen Trockengürtel, durch eine mäßige Ausweitung — mindestens Konstanz — des innertropischen Regengürtels, sowie durch eine erhebliche Verlagerung der Zyklonenzugbahnen auf der Nordhalbkugel zum Äquator hin. Das bedeutet eine Südwärtsverlagerung der großen planetarischen Frontalzone innerhalb der Westdrift um 10—15 Breitengrade, sowie gleichzeitig eine Einengung des Bereiches der tropisch-subtropischen Warmluft auf etwa 70% und eine entsprechende Ausweitung des Bereiches der arktischen Polarluft.

Diese Zirkulationsanomalie wurde (1) — einer seit 15 Jahren aus dem Gesichtswinkel des europäischen Wetterablaufs her entstandenen Bezeichnung (5) folgend — als „meridionale Zirkulation“ bezeichnet. Dieser Begriff gibt jedoch in globalem Rahmen zu Mißverständnissen Anlaß, da *Willett* (4) — von nordamerikanischen Erfahrungen ausgehend — gerade eine Verstärkung der Westdrift zugleich mit einer Verlagerung nach S als charakteristisch für die eiszeitliche Zirkulation betrachtet. Wir können (meist in Übereinstimmung mit *Willett*) für die Nordhalbkugel folgende Hauptpunkte der eiszeitlichen Zirkulation hervorheben:

1. Südverlagerung der zonalen Windgürtel, einschließlich der Zyklonenzugbahnen der Westdrift und damit der planetarischen Frontalzone; Verstärkung der Westdrift in der Breitenzone 30 bis 45° (vgl. Abb. 1 Mitte);
2. Verstärkung der zellularen Komponente der allgemeinen Zirkulation, Aufspaltung der zonalen Druck- und Windsysteme in quasistationäre, meridional angeordnete Zellen (low-index-Typ);
3. Verstärkung der innertropischen Konvergenzzone bei gleichzeitiger Abschwächung und Aufspaltung des subtropischen Hochdruckgürtels;
4. Aufspaltung der ozeanischen Tiefdruckzellen (Island- und Aläutentief) in mehrere Zellen, kombiniert mit Verstärkung und wohl auch (4) Vermehrung der quasistationären Höhentritte;
5. Ausbildung einer hochreichenden („warmen“) polaren Antizyklone.

Punkt 3 deckt sich nur teilweise mit *Willett's* Argumentation, der einen gegen heute verstärkten, aber 5—10° zum Äquator verschobenen Hochdruckgürtel annimmt. M. E. muß aber die offenbar notwendige Zunahme der Zyklonentätigkeit (4) im Bereich der innertropischen Konvergenz gedeutet werden als Folge der größeren Häufigkeit außertropischer Kaltluftausbrüche, die in der Höhe bis in die Zone des Urpassats vordringen und durchdringen und durch Überlagerung mit den E—W wandernden Wellenstörungen im Passat (easterly waves) tropische Zyklonen

erzeugen. Die von *Willett* (4) angenommene Verstärkung der Passatzirkulation hätte im Gegenteil — nach den neuen Erkenntnissen zur Dynamik des Passats (6) — eine Zunahme der Aridität in der Subtropenzone zur Folge gehabt. Hiergegen sprechen jedoch alle Beobachtungen der Pluvialzeit, die offenbar (7) zeitlich dem nordhemisphärischen Hochglazial gleichzusetzen ist.

Punkt 5 ergibt sich aus den aktuellen Erfahrungen — typisch hierfür ist die fast jedes Jahr im Frühjahr beobachtete Periode „meridionaler“ Zirkulation — und stimmt mit dem Fehlen einer pleistozänen Vereisung auf einigen hocharktischen Inseln überein, erscheint jedoch weniger gut gesichert als die Punkte 1 bis 3.

Für die Entwicklung einer Vereisung im nord-europäischen Raum ist die Ausbildung eines blockierenden Hochzentrums über Fennoskandien mit Höhentrog über Osteuropa ungünstig, weil so die Zufuhr von Warmluft nach dem norwegischen Hochgebirge begünstigt wird. Günstig ist aber eine Situation — wie sie im Winter 1952/53 ziemlich häufig war — bei der der Kaltluflthöhentrog über Norwegen und Mitteleuropa liegt, und das blockierende Hochzentrum im Raum zwischen Island und Schottland. In diesem Falle hat Nord- und Mitteleuropa übernormale Niederschläge bei unternormalen Temperaturen, und es resultieren schneereiche Winter bzw. kühle, bewölkte Sommer. Das entspricht dem Typ A der blockierenden Hochdruckgebiete, nach der Einteilung von *Brezowsky-Flohn-Heß* (8), während der erstgenannte Typ E sicher nicht als vereisungsfördernd bezeichnet werden kann.

Es ist sicher falsch, von der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre in der Eiszeit zu reden. Vielmehr müssen wir — ganz im Sinne der Ausführungen von *Büdel* (9) — unterscheiden zwischen den Zirkulationsbedingungen im Frühglazial, die mit allgemeiner Abkühlung zur Bildung der großen Inlandeisgebiete Anlaß geben, den z. T. ähnlichen während des Höhepunktes der Vereisung (Hochglazial), wo die klimatische Nahwirkung der Eisschilder besonders in Rechnung gestellt werden muß, und der mit allgemeiner Erwärmung den Rückgang der Vereisung erzeugenden Zirkulation des Spätglazials. Die Zirkulationsanomalie des Frühglazials muß vereisungsfördernd gewesen sein, die des Spätglazials dagegen vereisungshemmend bzw. -zerstörend. Die oben geschilderten Punkte 1 bis 5 beziehen sich — wie überhaupt der größte Teil dieser Ausführungen — auf das Frühglazial, größtenteils auch noch auf das Hochglazial. Der Umschwung vom Hochglazial muß eines der folgenschwersten Ereignisse in unserer Klimageschichte gewesen sein. Denn hier mußte

zunächst einmal der hochwirksame Mechanismus der Selbstverstärkung von Abkühlung und Eisbildung — wie er von *W. Wundt* u. a. mehrfach hervorgehoben wurde — unterbrochen werden: das bedeutet eine nachhaltige, radikale Umstellung in der Großzirkulation und in der Häufigkeit der Großwettertypen.

Das Aktualitätsprinzip ist cum grano salis auch für die klimatischen Auswirkungen der großen Vereisungszentren im Hochglazial anwendbar. Hierfür bieten Grönland und die Antarktis Beispiele, die in neuester Zeit vielfach studiert wurden und neue Schlüsse ermöglichen. Die Lehre von der glazialen Antizyklone (*Hobbs*) war meteorologisch immer widerspruchsvoll und muß heute als erledigt betrachtet werden. Nach den sorgfältig korrigierten Rechnungen von *Brockamp* (10) hat die grönländische „Antizyklone“ bei Eismitte nur einen um 2 mm Hg höheren Luftdruck als die Küstenstationen.

Tatsächlich werden beide große Inlandeiszentren von Zyklonen passiert, und ihre Ernährung erfolgt auf diesem Wege, wie es *Lamb* (1952) für die Antarktis aufgezeigt hat. Die in der Umgebung aller Inlandeisgebiete antizyklonal ausfließenden Winde folgen nicht dem Luftdruckgradienten, sondern der Schwere und beschränken sich auf eine ganz seichte Schicht von 2 bis 300 m (Gletscherwinde, katabatische Winde). Sie führen die sich über allen Schnee- und Eisflächen ständig bildende bodennahe Kaltluft (glaziale bzw. nivale Inversion [11]) nach den Seiten ab und beeinflussen so die Temperaturverhältnisse immerhin auf mindestens 50—100 km Abstand vom Eisrand. Sie führen zwar im statistischen Mittel zu einer Stabilisierung der Schichtung über dem gesamten Inlandeis und damit auch zu einer gewissen Abschwächung der niederschlagsliefernden Vertikalbewegungen im Bereich der Zyklonen, aber niemals zu ausschließlich absteigenden Luftströmungen, deren Wasserdampfgehalt an der Eisoberfläche als Reif sublimiert, wie das *Hobbs* annahm.

Diese stabilisierende Wirkung läßt sich rechnerisch abschätzen. Wir setzen die Fläche des antarktischen Inlandeises zu $13 \cdot 10^6$ km², seinen Umfang (roh) zu etwa $1,6 \cdot 10^4$ km, die Mächtigkeit des katabatischen Windes zu 300 m an. Die mittlere Windstärke der antarktischen Küstenstationen schwankt zwischen 2 und 30 m/sec, als Mittelwert kann 6 m/sec betrachtet werden. Wegen der ablenkenden Kraft der Erdrotation strömen diese Winde aber nicht senkrecht zur Küste, sondern schräg, und wir dürfen bei einer (mit der Höhe abnehmenden) mittleren Ablenkung des Bodenwindes über Land von 45° höchstens (!) die Hälfte des Betrages, also 3 m/sec, als ausströmende

Komponente ansetzen. Dann ergibt sich ein mittlerer Ausstrom von $3 \cdot 300 \cdot 1,6 \cdot 10^7 = 1,44 \cdot 10^{10}$ m³/sec senkrecht zur antarktischen Küste. Verteilt man diese Luftmenge über die Fläche des Inlandeises, so ergibt sich ein mittleres Absinken von $\frac{1,44 \cdot 10^{10}}{13 \cdot 10^{12}}$ m/sec = 0,11 cm/sec. Dieser Betrag ist mindestens eine Zehnerpotenz kleiner als die aufsteigenden Vertikalbewegungen an Fronten, die (großräumig) zwischen 1 und 10 cm/sec betragen, und spielt daher für die zyklonenbedingte (24) Ernährung des Inlandeises durch Niederschläge keine ins Gewicht fallende Rolle.

2. Temperaturverteilung in der Eiszeit

Mortensen (12) hat vor kurzem aus der Diskussion der Füllung der Firnmulden zur Eiszeit abgeleitet, daß die eiszeitliche Temperaturdepression sich nur auf die untersten Schichten beschränkt hat, unter Ausbildung einer Inversion bis etwa 2500 m, und daß in höheren Schichten die Temperatur keine Abnahme erfahren habe. Diese Argumentation erscheint in einigen Punkten ergänzungsbedürftig. An der Tatsache einer eisbedingten Inversion über den und in der näheren Umgebung der Vereisungsgebiete ist kein Zweifel möglich; diese existiert (11) über allen Eis- und Schneeflächen mit alleiniger Ausnahme der engbegrenzten Kaltluftzentren. Diese Tatsache war der Grund für die schon früher (1) ausgesprochene Auffassung, daß die eiszeitliche Temperatursenkung der eisnahen, niedrig gelegenen Gebiete nicht als repräsentativ angesehen werden kann. Andererseits habe ich gezeigt, daß in der äquatorialen Tropenzone die eiszeitliche Depression der Schneegrenze eine Temperaturabnahme der gesamten Troposphäre um etwa 4° (1) beweist. Der vielfach verallgemeinerte Wert von 8—12° gilt wohl nur für die eisnahen Gebiete, höchstens noch für die Bereiche der großen Höhenträge. Andererseits ist es schwer vorstellbar, die Temperatur der ganzen tropisch-subtropischen Atmosphäre — d. i. 50% der Erdatmosphäre — allein als sekundäre Folge der von einer Halbkugel ausgehenden Vereisungsabkühlung erklären zu wollen. In der inneren Tropenzone kann in der Eiszeit nur — ebenso wie heute — eine feuchtadiabatische Schichtung geherrscht haben, was sich aus der Konstanz bzw. Ausweitung der Niederschläge ergibt, und der hier gefundene Wert kann m. E. ohne Bedenken auf die gesamte tropische Region erweitert werden. Die Untersuchungen von Mensching (13) im subtropischen Atlas von Marokko führen ebenfalls auf eine Temperaturabnahme von 4° in der Schicht zwischen 2 und 4 km Höhe.

Da diese tropisch-subtropische Warmluft an den Wettervorgängen im Bereich der wandernden Zyklonen der mittleren Breiten beteiligt ist, so muß auch in diesem Bereich in der ganzen Troposphäre ein Temperaturrückgang von ähnlichem Betrag einkalkuliert werden, wenigstens im Mittel für ganze Breitenzonen. Andererseits wird im Bereich der großen Höhenträge die Abkühlung gegenüber der Jetztzeit größer gewesen sein, während auf der warmen Seite der zwischenliegenden Höhenhochkeile, also z. B. über der Westhälfte des Atlantik, wenigstens relativ eine Erwärmung festgestellt werden muß.

Für den Bereich der Polarluft haben wir kaum konkrete Anhaltspunkte. Die umfangreiche eiszeitliche Vergletscherung von Island und Spitzbergen, sowie der Faröer und der Bäreninsel ist m. E. nur durch eine Zunahme des Schneeanteils der Niederschläge erklärbar. So liegt bei den Faröern (66° N) die Jahrestemperatur im Meeresniveau bei 6,3° (März + 3,0, Juli + 10,6), so daß eine Schneedecke von längerer Dauer nicht beobachtet wird; nur 44 (von insgesamt 281) Niederschlagstage liefern Schnee. Um die eiszeitliche Lokalvergletscherung der Faröer (2, S. 590) zu erzeugen, muß eine Temperatursenkung um mindestens 5° angenommen werden; dann rücken die Monate November—April mit einem Niederschlagsanteil von (heute) 59% der Jahressumme in den Bereich negativer Temperaturen. Eine Temperatursenkung um 6° würde die Nullgrenze und damit wohl auch die Schneegrenze in das Meeresniveau senken; eine klimatische Wirkung des erst 150 km südostwärts beginnenden skandinavischen Inlandeises braucht hier wohl kaum in Rechnung gestellt zu werden. Bei der heute trotz einer Jahrestemperatur von — 3,8° unvergletscherten Bäreninsel (87 Tage mit Schneefall von insgesamt 139 Niederschlagstagen) liefert eine Temperaturdepression von 4° auch im Sommer Temperaturen um 0°, so daß auch in den Monaten Juni—September Schneefall überwiegt und Vereisung eintreten muß. In der Eiszeit muß hier wie auf dem flachen König-Karl-Land (vgl. 2, S. 576) die Schneegrenze im Meeresniveau gelegen haben.

Damit haben wir einige Anhaltspunkte für den eiszeitlichen Temperaturrückgang des Golfstroms wie der ozeanisch-subpolaren Klimaregion überhaupt. War der Golfstrom kälter, so bedeutet das auch für Nordnorwegen und den gesamten europäischen Sektor der Arktis einen Temperaturrückgang, der allerdings wohl — bei nur geringfügig veränderten Strahlungsverhältnissen — geringer als 4—6° war. Wegen der relativ geringen Änderung der Eisverhältnisse und der Wahrscheinlichkeit eines häufigen warmen Polarhochs

möchte ich die eiszeitliche Temperatur Senkung im Bereich nördlich 75° Breite auf nicht mehr als $2-3^\circ$ schätzen. Das würde eine leichte Abschwächung des meridionalen Temperaturgefälles zwischen Pol und Äquator bedeuten, wie sie in der schematischen Darstellung Abb. 1 (oben) auch angesetzt wird.

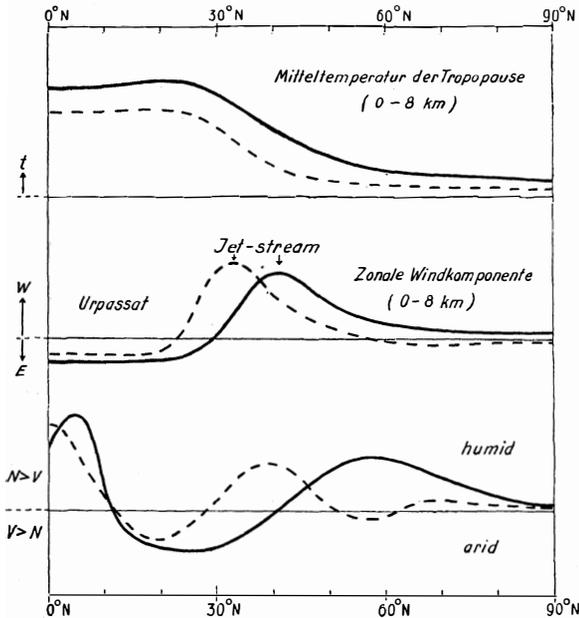


Abb. 1: Meridianschnitte jetzt (ausgezogen) und zur Eiszeit (gestrichelt), schematisch. Oben Mitteltemperatur der Schicht 0—8 km der Troposphäre (nicht Tropopause); Mitte West-Ost Komponente des mittleren Höhenwindes der Schicht 0—8 km, sowie mittlere Lage der planetarischen Frontalzone (Jet-stream); unten Verhältnis Niederschlag (nach oben) — Verdunstung (nach unten).

Für die gemäßigten Breiten (50° N) mag folgende Überlegung einen Anhalt liefern. Setzen wir — wegen der Bildung eisbürtiger Inversionen — in den vereisten und eisnahen Gebieten eine Depression der Temperatur um 13° an, in den ozeanischen Abschnitten dagegen eine solche von $3-5^\circ$, dann ergibt sich bei vernünftiger Interpolation eine Senkung des Breitenkreismittels von etwa $7,5^\circ$. Dieses Ergebnis ändert sich nur um $0,5^\circ$, wenn man in ozeanischen Regionen nur eine Senkung um $0-2^\circ$ ansetzt. Wir dürfen also — 7° als ein einigermaßen repräsentatives Breitenkreismittel 50° N der eiszeitlichen Temperaturdepression ansehen, ohne dabei einen Fehler zu machen, der 1° , allerhöchstens 2° übersteigt. Dieser Wert ist jedoch wegen der Inversion nur gültig in Bodennähe, und nicht repräsentativ für die freie Atmosphäre, in der ein geringerer Rückgang zu erwarten ist.

Für die Schichten zwischen 1000 und 3000 m können wir in Mitteleuropa und vergleichbaren Gebieten die eiszeitliche Depression der Schnee- und Waldgrenze um rund 1200 m als repräsentativ heranziehen, zumal (siehe Abschnitt 3) eine Niederschlagszunahme als Teilursache wegfällt. Dann ergibt sich bei einer mittleren Temperaturabnahme mit der Höhe von $5,0-5,5^\circ/\text{km}$ (29) in dieser Schicht (heute) ein eiszeitlicher Temperaturrückgang von $6-7^\circ$; wegen der auch heute vielfach etwas über 1000 m hinaufreichenden Inversionsbildung halte ich rund 5° für richtiger.

Damit können wir die Darstellung des mittleren thermischen Zustandes der freien Atmosphäre (12) unter Beschränkung auf das Jahresmittel zahlenmäßig unterbauen. Hierbei muß auch noch die — an sich klimatisch belanglose — Tatsache der Gegenläufigkeit zwischen Stratosphäre und Troposphäre (Abb. 2) Berücksichtigung finden; in dem Gebiet der Höhenträge sinkt über der hochreichenden Kaltluft die Tropopause auf polare Werte (nahe 300 mb ≈ 9 km) ab. Damit ähnelt wenigstens im Jahresmittel die eiszeitliche Temperaturverteilung über Mitteleuropa in recht plausibler Weise der heutigen über Labrador (Nitchequon, $53,2^\circ$ N, Boden -4° , 3000 m -9° , Tropopause -55° in 9560 m; am Boden Juli $+12^\circ$, Januar -23°).

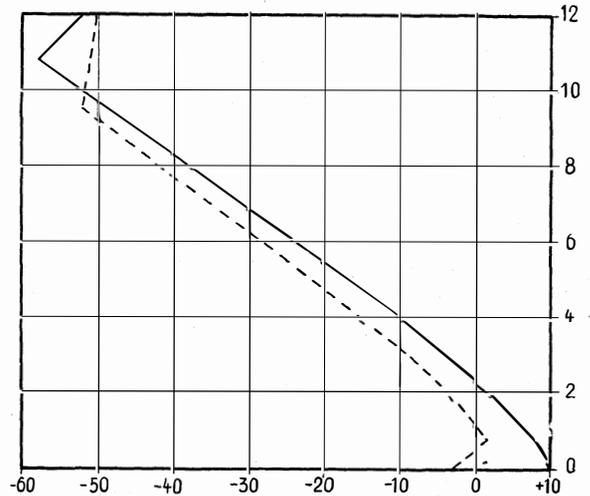


Abb. 2: Zustandskurve der Atmosphäre (Jahresmittele!) über Süddeutschland jetzt (ausgezogen) und in der Eiszeit (gestrichelt); Abszisse = $^\circ\text{C}$, Ordinate = km Höhe.

In seiner sehr interessanten Diskussion vernachlässigt Mortensen (12) etwas die überragende Bedeutung der Strahlung für die Ablation. Diese verursacht heute in den Hochlagen der Alpen nach Hoinkes (14) über 80% der beobachteten Ablation. Die Bewölkung spielt hierbei nur eine untergeordnete Rolle, da sie lediglich das Verhält-

nis zwischen Sonnen- und Himmelsstrahlung zu Gunsten der letzteren verschiebt. Die höchsten Werte der Strahlungsbilanz wurden (14) gerade bei starker, jedoch durchbrochener Bewölkung gemessen, während andererseits Bewölkung die nächtliche effektive Ausstrahlung (durch stärkere Gegenstrahlung) herabsetzt. Nach den Tabellen von *Milankowitsch* (15) war die sommerliche Zustrahlung vor 22 100 Jahren — vielfach als identisch mit dem Höhepunkt der Würmvereisung angesehen — nur um 1,5% niedriger als heute, die winterliche um 3,3% höher. Die Einstrahlung hat sich also nur unwesentlich geändert. Ebenso waren aber auch — nach den auf Auswertung der Formel *Lagallys* für die Fließgeschwindigkeit des Eises beruhenden Untersuchungen von *Reichel* (16) — die eiszeitlichen Niederschläge um 10—20% niedriger als die heutigen. Damit ist die gleich hohe Füllung der Firnfelder zur Eiszeit voll verständlich und liefert keine eindeutige Aussage über die Temperatur in dieser Höhe.

Darüber hinaus ist eine „andere Anordnung der Großwetterlagen“ (12), die von sich aus die Ausbildung einer Inversion von 10—15° in allen Jahreszeiten hervorruft, und damit erst eine Vereisung entstehen läßt, für den Meteorologen kaum vorstellbar. Die primären Ursachen müssen wohl in außerirdischen Vorgängen liegen; ihre Folge ist eine radikale Änderung der Häufigkeitsverteilung der Großwettertypen, die im Zusammenwirken mit einer gleichzeitigen allgemeinen Abkühlung (siehe oben) den Anstoß zur Vereisung gibt.

3. Niederschlag und Verdunstung während der Eiszeit

Über die Niederschlagsverhältnisse ist eine begründete Aussage nur schwer möglich. Zwar gibt *Klute* (17) eine Karte des Verhältnisses zwischen eiszeitlichen und heutigen Niederschlägen in Europa, ohne jedoch sich über die Methode (einer von ihm veranlaßten Dissertation) näher auszulassen. Diese Karte zeigt einen Rückgang der Niederschläge auf 60—80% im Mittelmeergebiet, auf weniger als 20% in Rußland; gegen diese Darstellung sind aber verschiedene Einwände möglich. Andererseits können wir die Frage nach der Gesamtmenge der Niederschläge von den oben gewonnenen Gesichtspunkten her doch weitertreiben. Das ist möglich auf dem Umweg über die Verdunstung. Bekanntlich muß im Mittel die Gesamtniederschlagsmenge N_E auf der Erde der Gesamtverdunstung V_E die Waage halten. Die Frage der Umlaufgeschwindigkeit des Wasserhaushaltes ist hierbei für die statistische Mittelbildung unwesentlich. Der größte Teil der

Verdunstung wird in subtropischen und tropischen Breiten geleistet, und die neueren Untersuchungen von *Albrecht*, *Jacobs*, *Reichel* (vgl. 18) u. a. geben quantitativ verwertbare Resultate über den Wasserhaushalt der Erde. Die Verdunstung auf dem Meer V_M liefert über 83% der Gesamtniederschlagsmenge der Erde $N_E = V_E$. Sie kann aus folgender Näherungsformel abgeschätzt werden:

$$V_M \approx k \cdot v \cdot (E - e)$$

Hierbei ist k eine Konstante¹⁾, v die mittlere Windgeschwindigkeit, E bzw. e der maximale bzw. beobachtete Dampfdruck, sofern Wasser- und Lufttemperatur praktisch gleich sind; dann ist $E - e$ das Dampfdruckgefälle zwischen der Wasseroberfläche und der Luft. In der unmittelbaren Äquatorialzone (φ bis 5° Breite) kann die Windgeschwindigkeit in der Eiszeit nicht wesentlich anders gewesen sein als heute, da hier der Luftdruckgradient keine Rolle spielt und die verschwindende Coriolis-Kraft alle aufkommenden Stürme sehr rasch wieder abdämpft; wir können also den Wert für v als konstant betrachten. Die Temperatur der Ozeanoberfläche kann sich in den Tropen nicht wesentlich ($< 1^\circ$) von der Lufttemperatur unterscheiden haben, da die Ausdehnung der Kontinente in der Äquatorialzone nur gering ist; wir dürfen daher mit einer Oberflächentemperatur der Ozeane von 23° rechnen. Ein stärkeres Absinken derselben hätte sich auch in den Tiefseebohrkernen der Albatrosexpedition auswirken müssen. Hiervon ist ebensowenig bekannt, wie etwa von einem Absterben der Korallen; damit ist eine Temperatur der tropischen Ozeane von mindestens 20—21° während der letzten Eiszeit gesichert. Eine merkliche Abnahme des Feuchtegehalts der äquatorialen Atmosphäre ist unwahrscheinlich, da der innertropische Regengürtel konstant geblieben ist bzw. sich noch ausgeweitet hat. Die beste Annahme ist infolgedessen die einer Konstanz der relativen Feuchte. Rechnet man unter diesen Voraussetzungen das Sättigungsdefizit bzw. das vertikale Dampfdruckgefälle $E - e$ aus, dann ergibt sich eine Abnahme der Verdunstung um rund 20% (Tab. 1). Nehmen wir umgekehrt Konstanz der Verdunstung an, dann ist das bei der gesunkenen Temperatur nur möglich bei einem Rückgang der Luftfeuchtigkeit auf 71%; das entspricht einer Abschwächung des äquatorialen Regengürtels und widerspricht so den Beobachtungen.

Für die *Passatzone* (20—25° N) ist ein ähnlicher Vergleich möglich. Hier liegt heute die

¹⁾ Diese Konstante dürfte etwas abhängen von der vertikalen Temperaturschichtung (Stabilität), die jedoch für die Tab. 1 angegebenen Breitenzonen nur unwesentlich von der heutigen abweichen kann.

Temperatur der Luft und der Ozeane bei 25° ; setzen wir auch hier (bei konstanter relativer Feuchte über Meer) eine eiszeitliche Abkühlung um 4° an, dann ergibt sich ebenfalls ein Rückgang des Dampfdruckgefälles um etwa 20%. Hier ist sehr wahrscheinlich die Windstärke v in der Eiszeit kleiner als die heutige, da gemäß Punkt 3 (Abschnitt 1) der Passat eher schwächer war als heute. Auch wenn wir mit *Willett* (4) eine Verlagerung eines verstärkten subtropischen Hochdruckgürtels um etwa 10° nach Süden ansetzen, rückt dieser in die Zone $20-25^\circ$, so daß hier die Windstärke nur gering sein kann. Damit geht die Meeresverdunstung V_M dieser Zone maximaler Verdunstung um mehr als 20%, vielleicht um 30–50% gegenüber heute zurück. In diesem Zusammenhang verdient es Erwähnung, daß nach *Zeuner* (31) in dieser Breitenzone Indiens zwar mehrere Trockenzeiten nachweisbar sind, daß aber zu keiner Zeit des Pleistozäns die Humidität größer war als heute.

lich gilt diese Ableitung nur für die Gesamtmenge $N_E = V_E$, während über die Verteilung von N_E auf die Breitenzonen — und damit auch für die äquatoriale Zone — hieraus nichts ausgesagt werden kann. Jedoch scheidet — von regionalen Ausnahmen wie der Antarktis abgesehen — Niederschlagszunahme als Ursache der Eiszeit aus der Diskussion aus.

Es ist daher auch keine Überraschung, wenn in eisnahen Gebieten, wie etwa dem eisfreien Mitteleuropa sowie den Lößgebieten Südrußlands, in der Eiszeit aridere Verhältnisse herrschten als heute. Die sommerlichen, meist konvektiven Niederschläge waren zweifellos erheblich kleiner als heute, da bei einer Temperaturdepression von 10° der Dampfdruck — von dem die Menge dieser Niederschläge in erster Linie abhängt — auf die Hälfte absinkt; die winterlichen Mengen gehen wegen der Verlagerung der Zyklonenzugbahnen nach S ebenfalls zurück. Für Nord- und Mittelchina muß ebenso angenommen werden,

| Breite | | t | E | RF | e ²) | E—e | D |
|----------|------------------|------|---------|-----|------------------|--------|------------------|
| 0—5° N | heute Eiszeit | 27°C | 26.7 mm | 78% | 20.6 mm | 6.1 mm | -1.2 mm (20%) |
| | | 23 | 21.1 | 78 | 16.2 | 4.9 | |
| 20—25° N | heute Eiszeit | 25 | 23.8 | 78 | 18.3 | 5.5 | -1.2 mm (22%) |
| | | 21 | 18.7 | 78 | 14.4 | 4.3 | |

Tab. 1: Vergleich der heutigen und der eiszeitlichen Atmosphäre über Meer in den inneren Tropen (0–5° N) und der Passatzzone (20–25° N). t = Temperatur der Luft und des Wassers, e (E) = mittlerer (maximaler) Dampfdruck, RF = relative Feuchte, D = Differenz heute — Eiszeit.

Wenn auch diese Betrachtungen nicht ohne weiteres auf die übrigen Breitenzonen übertragen werden dürfen, so scheint mir doch gesichert zu sein, daß die Gesamtverdunstung V_E und die Gesamtniederschlagsmenge N_E der Erde niedriger war als heute (810 mm nach *Reichel*). Da in den eisnahen Gebieten wegen der stärkeren Temperaturdepression die Verdunstung noch mehr zurückgegangen sein dürfte, so glaube ich den Wert von 20% als einen Mindestwert kennzeichnen zu dürfen. Hinzukommt, daß die Verschmälerung des Gürtels der außertropischen Wälder einen erheblichen Rückgang der pflanzlichen Transpiration verursachte, die wahrscheinlich nicht durch die Zunahme der Vegetation in der Trockenzone kompensiert wird; damit dürfte auch die Landverdunstung V_L zurückgegangen sein. Diesen Schluß auf einen Rückgang der Niederschläge in der Eiszeit hat *Lautensach* (19) schon 1942 gezogen. Noch frühere Hinweise erscheinen durchaus wahrscheinlich; auf *Reichels* Arbeit (16) wurde schon oben hingewiesen. Selbstverständ-

daß in der Eiszeit die sommerliche Verlagerung der niederschlagsliefernden Frontalzone nach N weniger weit reichte als heute, so daß die Sommerregen dieses Gebietes erheblich geringer waren. Andererseits muß im Mittel der Breitenzone $25-35^\circ$ N, die damals der planetarischen Frontalzone und dem Hauptzuggebiet der Fronten und Zyklonen entsprach, die Niederschlagshäufigkeit und vielleicht auch die Niederschlagsmenge größer gewesen sein als heute, so daß das Klima einen humideren Charakter annahm. Diese größere Humidität der subtropischen Trockenzone ist schon öfters hervorgehoben worden. Abb. 1 (unten) stellt die Ergebnisse dieser Diskussion über die Verschiebungen humider und arider Zonen schematisch dar.

Wißmann (20) hat in einer Diskussionsbemerkung betont, daß in der Eiszeit neben einer Einengung des subtropischen Hochdruckgürtels eine Ausweitung der kontinentalen Trockenzone erfolgt ist, für die *Wilhelmy* (21) in Südamerika Belege beigebracht hat. Dies erscheint besonders im Bereich der großen Höhentöpfe (vielleicht auch im Osten Südamerikas) sehr wahrscheinlich. Hier mag die eiszeitliche Temperaturdepression

²) Geht man statt der hier verwendeten Werte für RF von den beobachteten Mittelwerten (Januar und Juli) für e aus, so ergeben sich nur ganz geringfügige Änderungen.

rund 8° betragen haben. Das ergibt aber für den Dampfdruck und damit für die Kapazität der Niederschläge einen Rückgang auf knapp 60%. Dabei dürfte die Verdunstung in den Gebieten ohne Waldbedeckung schon von vornherein wegen der Zunahme des Windes in Bodennähe eher stärker gewesen sein als heute, mindestens aber relativ zur Abnahme des Niederschlags. Die Zunahme der Aridität in den kontinentalen Bereichen ist daher verständlich; Abb. 1 (unten) nimmt für die Breitenzone $50\text{--}60^\circ$ ein schwaches Überwiegen der Aridität an.

4. Die Sonderstellung der Südhalbkugel

Die Verhältnisse auf der Südhalbkugel weichen in vielen Richtungen ab von denen der Nordhalbkugel. Die Beobachtungen der Klimastationen jenseits 45° S, z. B. der Laurie-Insel (Südorkneys 60.7° S) seit 1903, haben keine Zunahme der Temperatur feststellen lassen (22). Dies steht im Gegensatz zu allem, was wir aus höheren Breiten der Nordhalbkugel wissen. Andererseits ist die Zirkulation des Südhalbkugel charakterisiert durch das starke Zurücktreten von meridionalen Zirkulationstypen, die zwar nicht völlig fehlen, aber nicht entfernt die Bedeutung haben wie auf der Nordhalbkugel. Diese Tatsache steht im Zusammenhang mit dem wesentlich größeren meridionalen Temperaturgefälle, so daß gerade die Aufrechterhaltung des antarktischen Kaltluftgebietes wechselseitig verknüpft ist mit dem Fehlen stärkeren meridionalen Austauschs. Stärkere Zonalzirkulation ist also nicht gleichzeitig verbunden mit einer Zunahme des Meridionalaustauschs; eher besteht eine gegenteilige Beziehung. Allerdings steht eine schlüssige quantitative Behandlung des ganzen, sehr tiefgreifenden Problems noch aus. Unter diesem Gesichtspunkt müssen auch die Überlegungen von *Viète* (23) einer gewissen Revision unterzogen werden.

Die von *Meinardus* angenommene eiszeitliche Niederschlags- und Temperaturzunahme der Antarktis läßt sich wahrscheinlich durch eine gesteigerte Meridionalzirkulation auch der Südhalbkugel erklären. Daß das antarktische Inlandeis durch wandernde Zyklonen ernährt wird, hat *H. H. Lamb* (24) mit Wetterkarten sehr wahrscheinlich gemacht. Ebenso steht hiermit vielleicht im Zusammenhang die Tatsache, daß die südhemisphärischen Trockengebiete an den Westküsten (Südafrika, Nordchile) nach Hinweisen von *Mortensen* (12) in der Eiszeit ebenso vorhanden waren wie heute. Es muß aber sorgsam geprüft werden, ob diese Erscheinung nicht doch regional beschränkt ist auf die Küstenwüsten, die von kalten Meeresströmungen hervorgerufen werden. Der Mechanismus der Trockenheit ist

hier ein anderer: die Stabilisierung der untersten Luftschichten durch das kalte Auftriebwasser verhindert alle konvektiven Vertikalbewegungen in der Atmosphäre, die gerade in subtropischen Breiten fast allein wirksame Niederschläge erzeugen. Selbst wenn in diesen Gebieten während der Eiszeit die Frontenhäufigkeit stärker war als heute, so können sich doch die durchziehenden Kaltfronten wegen dieser ständigen Stabilisierung im Gebiet der Küstenwüsten nicht auswirken, wohl aber im dahinterliegenden Gebirgsland der chilenischen Anden. Die in Abschnitt 1 gegebene Diskussion der eiszeitlichen Zirkulation müßte jedenfalls für die Südhalbkugel noch modifiziert werden.

5. Zur Frage der Ursachen der Eiszeit

Die Entwicklung der jüngsten Zeit läßt das Problem der Entstehung der Eiszeiten in ursächlicher Hinsicht immer komplizierter werden. Bevor man hier eine abschließende und allgemein verbindliche Deutung geben kann, müssen folgende Forderungen erfüllt sein:

a) Kartenmäßige Darstellung der Vegetations- bzw. Klimazonen während des Höhepunktes der letzten Eiszeit in weltweitem Rahmen, unter besonderer Berücksichtigung der ozeanischen Inseln.

b) Eingehende quantitative Klärung der Ursachen der jetztzeitlichen Gletscherschwankungen und deren regionaler Unterschiede.

Gerade der letztere Punkt ist für die Deutung der eiszeitlichen Verhältnisse von entscheidender Bedeutung. Hier sind vage Vermutungen und Hypothesen so lange fehl am Platze, als nicht im Verfolg des von *Ahlmann* aufgestellten Programms die Bilanzen zwischen Niederschlag und Ablation der heutigen Gletscher weltweit vergleicht sind. Da die Sonnen- und Himmelstrahlung (Globalstrahlung) mit der Höhe zunimmt, ist die einfache thermische Betrachtungsweise früherer Zeiten heute nicht mehr ausreichend und muß durch andere Überlegungen ergänzt werden. Allem Anschein nach nimmt die Rolle der Strahlung von polaren nach niedrigen Breiten hin zu (14).

Von neueren Überlegungen zur Frage der Ursache der Eiszeiten sind zwei in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Zunächst haben *Broekamp* (25) und *Lotze* die Übereinstimmung zwischen der Lage der Inlandeiszentren und den längst konsolidierten alten Schilden der Nordkontinente zum Ausgangspunkt ihrer Überlegungen gemacht. In den alten Schilden ist die geothermische Tiefenstufe wesentlich größer, der innere Wärmestrom also geringer. Das führt bei allgemeiner Abkühlung dazu, daß in diesen Gebieten

die Plastizität und Fließgeschwindigkeit des Eises wesentlich kleiner ist, als in anderen Gebieten. Auch wenn diese Auffassung nur als zusätzliches Argument gewertet werden soll, so muß doch dagegen eingewandt werden, daß die primäre Temperaturabkühlung, wie sie heute als sichergestellt bezeichnet werden muß, davon nicht berührt wird. Weiterhin gibt es alte Schilde, wie etwa das Angaraland in Mittelsibirien, das trotz seiner relativ großen Höhenlage und Gebirgsstruktur in der letzten Eiszeit eine nur verhältnismäßig unbedeutende Vereisung trug, die in keiner Weise mit dem umfangreichen laurentischen Inlandeis verglichen werden kann. Man wird daher wohl bei der Diskussion der Verteilung der Eiszentren auch in Zukunft an dem Primat klimatischer Ursachen festhalten müssen, während die geringere Wärmeleitfähigkeit der frühkonsolidierten Massive sich nur sekundär — in der Erhaltung des Inlandeises — auswirken kann. Vor einer Überschätzung der Rolle des inneren Wärmestroms wurde aus quantitativen Überlegungen bereits früher (1) gewarnt.

Der zweite wesentliche Gesichtspunkt ist die Diskussion der Auswirkungen solarer Vorgänge. Hier steht die Frage der Solarkonstanten und ebenso auch die einer veränderlichen Absorption im Weltraum, etwa durch Vorhandensein kosmischer Dunkelwolken, z. Z. kaum zur Diskussion. Vielmehr wissen wir, daß die Sonne im Hinblick auf die Ultraviolettstrahlung und die Korpuskularstrahlung ein veränderlicher Stern ist, ohne daß wir die Gesetze dieser Veränderungen schon physikalisch deuten könnten. Diese Veränderungen werden als solche der Aktivität der Sonne bezeichnet, für die die Häufigkeit der sog. Sonnenflecken nur ein sehr grobes, in erster Annäherung brauchbares Maß darstellt. Wenn man nun die Änderungen der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang setzt mit den Phasen der Sonnenaktivität (11- bzw. 22jährige Periode), dann bekommt man ein Bild, das in verblüffender Weise mit den eiszeitlichen Zirkulationsanomalien übereinstimmt. Wir erhalten — auf Anführung und Diskussion des umfangreichen Belegmaterials in Arbeiten von *B.* und *G. Duell*, *R. Scherhag*, *H. Wexler*, *H. Willett*, *H. Craig* und dem Verfasser muß in diesem Zusammenhang leider verzichtet werden — in den Perioden maximaler Sonnenaktivität die Tendenz zum Aufbau von Hochdruckgebieten über dem Polargebiet, eine Südwärtsverlagerung der Westdrift und besonders der planetarischen Frontalzone, eine Akzentuierung der meridionalen Zirkulationstypen und damit zugleich eine Abschwächung der Intensität der Zonalzirkulation. Das entspricht genau den Unterschieden zwischen eis-

zeitlicher und jetztzeitlicher Zirkulation oder, um es noch schärfer zu formulieren, den Unterschieden zwischen vereisungsfördernder und vereisungshemmender bzw. -zerstörender Zirkulation.

Damit haben wir also, wiederum dem Aktualitätsprinzip folgend, einen Zusammenhang gefunden, der offenbar ursächlich für die jetztzeitlichen Zirkulationsanomalien ausschlaggebend ist. Es bedarf keiner großen Phantasie, um — wie dies besonders auch *Willett* (26) tut — den Schluß auf die Ursachen der eiszeitlichen Zirkulationsanomalien zu ziehen. Dieser Schluß ist insofern etwas unbefriedigend, weil er die eigentliche Problematik nur verschiebt in ein Gebiet, in dem jedenfalls von seiten der Geologie oder der Meteorologie keine exakten Forschungen mehr möglich sind. Diese Solaraktivitätshypothese von *Huntington* und *Willett* ist also empirisch weder zu beweisen noch zu widerlegen; sie kann jedoch durch Analogieschlüsse immerhin glaubhaft, ja sogar wahrscheinlich gemacht werden. Sicher ist sie weit weniger unbefriedigend als manche ad hoc konstruierte Theorie, wie etwa die der kosmischen Dunkelwolken. Wenn *Öpik* (27) unlängst gewisse Änderungen der atomaren Prozesse — die die Sonnenenergie erzeugen — für die Eiszeit verantwortlich macht, dann dürfte auch diese Hypothese sich nicht nur auf die Photosphärenstrahlung im Sichtbaren, sondern in erster Linie auf die viel stärker veränderliche UV-Strahlung und andere Teile des Spektrums beziehen. Eine befriedigende und vollständige Theorie der Sonnenaktivität steht noch aus. Die Sonne ist — wenn auch wohl kaum in dem sichtbaren Spektralbereich, sicher aber in anderen Spektralklassen — ein veränderlicher Stern, dessen Strahlungsintensität in einzelnen Bereichen um mehrere Zehnerpotenzen schwanken kann. Kein Argument hindert uns daran, Schwankungen dieser Art für Klimaänderungen geologischer Vorzeiten in erster Linie verantwortlich zu machen, wenn diese mit den großzügigen, einwandfrei auf solare Vorgänge zurückzuführenden Klima-Anomalien der Jetztzeit räumlich übereinstimmen.

Diese Hypothese erscheint heute vom meteorologischen Gesichtspunkt aus wesentlich besser gestützt als die bekannte astronomische Hypothese von *Milankowitsch* (15, 30): Denn für diese gibt es kein aktuelles Belegmaterial; über die mit einer jahreszeitlichen und breitenmäßigen Variation der Gesamtstrahlung der Sonne einhergehenden Zirkulationsänderungen besitzen wir überhaupt keine wirklich begründete Vorstellung. Wenn es auch sicher unzulässig ist, diese Schwankungen ganz außer Betracht zu lassen, so gibt es doch (2, 3, 26, 28) gewichtige Grün-

de gegen die ausschließliche Anwendung und Überbetonung dieser Hypothese. Wesentlich ist dabei der neue Befund (7, 13) der Gleichzeitigkeit von Eiszeit (in höheren Breiten) und Pluvialzeit (in den Subtropen und Randtropen), die durch die Rechnungen *Milankowitschs* offenbar nicht gedeutet werden kann (vgl. hierzu *Wundt*) (30). Neben der Solaraktivitätshypothese und neben den auch großklimatisch wirksamen Einflüssen des Reliefs (1), die allerdings in einigen Einzelheiten noch kontrovers sind, spielen diese astronomisch bedingten Schwankungen der Strahlungsverteilung (nach Ansicht des Verfassers) nur eine begleitende und modifizierende Rolle.

Zusammenfassung:

Die Diskussion des Eiszeitklimas wird vom meteorologischen Standpunkt weitergeführt. Nach einer Charakterisierung der allgemeinen Zirkulation im Früh- und Hochglazial ergibt sich die Rolle der „glazialen Antizyklone“ quantitativ als geringfügig. Ein allgemeiner Rückgang der Temperatur um etwa 4° ist für die Tropen- und Subtropenzone belegt. In den eisnahen Gebieten treten kräftige Bodeninversionen auf; die eiszeitliche Zustandskurve für Süddeutschland läßt sich annähernd abschätzen, ebenso wie die eiszeitliche Änderung der mittleren Wind-, Temperatur- und Niederschlagsverteilung. Die Gesamtmenge der Verdunstung (und damit auch des Niederschlags) war um mindestens 20% niedriger als heute. Die Ursache der Eiszeiten darf am wahrscheinlichsten (mit *Huntington* und *Willett*) in den Schwankungen der Sonnenaktivität in einzelnen Spektralbereichen gesehen werden, da die hiermit zusammenhängenden aktuellen Klima-Anomalien die gleiche räumliche Verteilung zeigen, wie die eiszeitlichen.

Literatur

1. *Flohn, H.*: Allgemeine atmosphärische Zirkulation und Paläoklimatologie. Geol. Rundsch. 40, 153—178 (1952).
2. *Klebelberg v., R.*: Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie. Wien 1949.
3. *Schwarzbach, M.*: Das Klima der Vorzeit. Stuttgart 1950.
4. *Willett, H. C.*: The general circulation at the last (Würm) glacial maximum. Geogr. Ann. 31, 179—187 (1950).
5. *Hess, P., Brezowsky, H.*: Katalog der Großwetterlagen Europas. Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone 33 (1952).
6. *Flohn, H.*: Die Revision der Lehre von der Passatzirkulation. Met. Rundsch. 6, 1—6 (1953).
7. *Büdel, J.*: Bericht über klima-morphologische und Eiszeitforschungen in Niederafrika. Erdkunde 6, 104—132 (1952).
8. *Brezowsky, H., Flohn, H., Hess, P.*: Some remarks on the climatology of Blocking action. Tellus 3, 191—194 (1951).
9. *Büdel, J.*: Die räumliche und zeitliche Gliederung des Eiszeitklimas. Naturwiss. 36, 105—112, 133—139 (1949).
10. *Brockamp, B.*: Nachtrag zu den wissenschaftlichen Ergebnissen der Deutschen Grönland-Expedition Alfred Wegener. N. Jb. Geol. Pal. Abh. 93, 177—232 (1951).
11. *Flohn, H.*: Zur Aerologie der Polargebiete. Met. Rundschau 5 (1952), 81—87, 121—128.
12. *Mortensen, H.*: Heutiger Firnrückgang und Eiszeitklima. Erdkunde 6, 145—160 (1952).
13. *Mensching, H.*: Morphologische Studien im Hohen Atlas von Marokko. Würzb. Geogr. Arb. 1 (1953).
14. *Hoinkes, H., Untersteiner, N.*: Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern I. Geogr. Ann. 34, 99—158 (1952).
15. *Milankowitsch, M.*: in Köppen-Geiger, Handb. Klimatologie, I A (1936).
16. *Reichel, E.*: Versuch einer Berechnung der eiszeitlichen Niederschlagshöhe in den Alpen. Z. Gletscherkunde, 22, 73—80 (1935).
17. *Klute, F.*: Das Klima Europas während des Maximums der Weichsel-Würm-Eiszeit und die Änderungen bis zur Jetztzeit. Erdkunde 5, 273—283 (1950).
18. *Reichel, E.*: Der Stand des Verdunstungsproblems. Ber. Dt. Wd. US-Zone 35 (1952), 155—172.
19. *Lautensach, H.*: Portugal in der Eiszeit. Z. Gletscherkunde 28, 20—59 (1942).
20. *Wissmann, H. v.*: Diskussionsbemerkung siehe Verh. Dt. Geogr.-Tag Frankfurt 28, 305—306 (1951).
21. *Wilhelmy, H.*: Die eiszeitliche und nacheiszeitliche Verschiebung der Klima- und Vegetationszonen in Südamerika. Verh. Dt. Geogr.-Tag Frankfurt 28, 121—127 (1951).
22. *Prohaska, F.*: Zur Frage der Klimaänderung in der Polarzone des Südatlantik. Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B. 3, 72—81 (1951).
23. *Viète, G.*: Über die allgemeine atmosphärische Zirkulation während der diluvialen Vereisungsperioden. Tellus 2, 102—115 (1950).
24. *Lamb, H. H.*: South Polar atmospheric circulation and the nourishment of the Antarctic Ice-Cap. Meteor. Mag. 81, 33—42 (1952).
25. *Brockamp, B.*: Zur Frage der Vereisungszentren. N. Jb. Geol. Paläont. Mh. 193—202 (1952).
26. *Willett, H. C.*: Long-period fluctuations of the general circulation of the Atmosphere. Journ. Meteor. 6, 34—50 (1949).
27. *Öpik, E. J.*: Secular changes of stellar structure and the ice ages. Monthl. Not. Roy. Astron. Soc., 110, 49 bis 69 (1950); Ref. Met. Abstr. Bibliogr. 2, 113 (1951).
28. *Woldstedt, P.*: Die Quartärforschung in Deutschland. Z. Dt. Geol. Ges. 100, 379—399 (1948).
29. *Holzappel, R.*: Der mittlere Zustand der freien Atmosphäre über Berlin und München. Mitt. Dt. Wetterdienst US-Zone 8 (1951).
30. *Wundt, W.*: Die Mitwirkung der Erdbahnelemente bei der Entstehung der Eiszeiten. Geol. Rundsch. 34, 713 bis 747 (1944).
31. *Zeumer, F. E.*: Das Problem der Pluvialzeiten. Geol. Rundsch. 41, 242—252 (1953).