

SEPARAT-ABDRUCK
AUS DEM
NEUEN JAHRBUCH
FÜR MINERALOGIE, GEOLOGIE UND PALÄONTOLOGIE.
Beilage-Band XXIX.
(S. 106—179.)

Ueber einige paläoklimatische Probleme.

Von

E. Philippi in Jena.



Stuttgart.
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
Nägele & Dr. Sproesser.
1910.

Ueber einige paläoklimatische Probleme.

Von

E. Philippi in Jena.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Die physikalischen Grundlagen der Kohlensäurehypothese . . .	107
2. Die untercambrische Vereisung	110
3. Die jungpaläozoische Vereisung	112
4. Die Klimaentwicklung der mesozoischen Ära	114
5. Klima der Tertiärperiode	118
6. Die quartäre Eiszeit	120
7. Die Erklärung der permischen Vereisung	124
8. Das gleichmäßige Klima und die Ausbildung von Klimazonen	129
9. Über die sogen. Einheitlichkeit der quartären Eiszeit	132
10. Die Analogien zwischen Permocarbon und Quartär-Tertiär	140
a) Vulkanismus und Tektonik	141
b) Kohlenbildung und Gebirgsaufrichtung	144
c) Beziehungen zwischen Eiszeiten auf der einen, Vulkanismus, Gebirgsaufrichtung und Kohlenbildung auf der anderen Seite	145
11. Über einige Eiszeithypothesen	148
a) Erklärungsversuche auf morphologischer Grundlage	149
b) Allgemein tellurische Ursachen	152
c) Kosmische Ursachen	162
A. Änderungen in der Schiefe der Ekliptik	163
B. Änderungen in der Exzentrizität der Erdbahn und die Präzession der Äquinoktialpunkte	164
C. Änderungen in der Intensität der Sonnenstrahlung . . .	168
12. Zusammenfassung	176

In neuerer Zeit ist in Geologenkreisen viel über eine physikalisch-klimatologische Frage gestritten worden: nämlich über das Verhalten der Kohlensäure gegenüber dunklen Wärmestrahlen und

über die Versuche, aus ihm die Klimaänderungen der Vorwelt zu erklären. In einem kleinen Aufsätze über die permische Eiszeit¹ habe ich mich dahin ausgesprochen, daß zwar die physikalische Grundlage der Kohlensäurehypothese von ARRHENIUS und FRECH einwandfrei erschiene, daß aber jeder Versuch, mit ihr die uns bekannten geologischen Tatsachen zu erklären, in Widersprüche verwickelte.

Dieser Anschauung ist von zwei Seiten entgegengetreten worden. E. KAYSER hat, insbesondere fußend auf Mitteilungen seines Bruders, darzulegen² versucht, daß auch die physikalischen Grundlagen der ARRHENIUS-FRECH'schen Hypothese nicht aufrecht zu halten sind. FRECH³ hat aber neuerdings im Gegensatz zu KAYSER wie zu mir ausdrücklich hervorgehoben, daß die Auffassung von ARRHENIUS vom physikalischen Standpunkte aus unangreifbar sei und daß sie durch geologische Befunde in jeder Weise gestützt werden könne.

1. Physikalische Grundlagen und Anwendbarkeit der Kohlensäurehypothese.

Zu der Frage, ob die physikalischen Grundlagen der Kohlensäurehypothese unantastbar sind oder nicht, kann ich nichts Wesentliches beisteuern; es geht mir leider die Möglichkeit ab, eigene physikalische Untersuchungen darüber anzustellen oder fremde mit ganz ausreichendem Verständnis zu verfolgen. Die Anschauung, die ich mir aus der Literatur und aus Gesprächen mit Physikern gebildet habe, ist folgende: Daß die Kohlensäure die Fähigkeit besitzt, dunkle Wärmestrahlen bis zu einem gewissen Grade zu absorbieren, ist eine Tatsache, die schon von TYNDALL entdeckt wurde und jederzeit leicht durch das Experiment nachzuprüfen ist. Da nun die irdische Atmosphäre einen gewissen Prozentsatz von Kohlensäure enthält, so müssen die von der Erdoberfläche ausgehenden dunklen Wärmestrahlen zum Teil eine Absorption erleiden; die Kohlensäure der Atmosphäre

¹ E. PHILIPPI, Über die permische Eiszeit. Centralbl. f. Min. etc. 1908. p. 353.

² E. KAYSER, Zur ARRHENIUS-FRECH'schen Kohlensäurehypothese. Ebenda. p. 553.

³ F. FRECH, Über das Klima der geologischen Perioden. Dies. Jahrb. 1908. II. 74.

bildet also eine schützende Decke um die Erdoberfläche, die diese vor allzu starken Wärmeverlusten bewahrt. Es scheint jedoch die absorbierte Wärmemenge nicht proportional der Dicke der Kohlensäureschicht zu sein, sondern in viel langsamerem¹ Tempo zu steigen, als diese. SCHÄFER behauptet sogar, daß oberhalb einer gewissen Schichtdicke, welche die Kohlensäure schon ziemlich rasch erreicht, eine weitere Steigerung der Absorption überhaupt nicht mehr stattfindet.

Selbst wenn die experimentellen Arbeiten zu ganz übereinstimmenden Daten geführt hätten — was meines Wissens bisher nicht der Fall ist —, so würde es voreilig sein, ihre Resultate ohne weiteres auf die irdische Atmosphäre zu übertragen. Das Problem kompliziert sich hier dadurch, daß die Kohlensäure nicht, wie der Wasserdampf, in den untersten Luftschichten konzentriert, sondern ziemlich gleichmäßig über die gesamte Atmosphäre verteilt ist. Die Höhe² der Atmosphäre, ihre Temperaturen und mancherlei anderes gehen hier mit in Rechnung, und aus der einfachen Gleichung, wie sie uns das Experiment liefern würde, wird eine solche mit mehreren Unbekannten. Ferner muß die Absorption der Kohlensäure durch das Meerwasser eine bedeutsame Rolle spielen. Es ist daher nicht gleichgültig, ob in vergangenen Erdperioden die Meere flach und ausgedehnt oder tief und schmal waren, ob sie hauptsächlich in höheren oder niederen Breiten lagen.

Mein Laienstandpunkt, zu dem mich besonders ARRHENIUS' „Kosmische Physik“ geführt hat, ist folgender. Ich kann es nicht bezweifeln, daß die Kohlensäure der Atmosphäre, wenigstens bis zu einer bestimmten Maximalgrenze, für die Klimabildung an der Erdoberfläche von Bedeutung ist. Jedoch läßt sich die Wirksamkeit der Kohlensäure in der Erdatmosphäre bisher lediglich schätzen, nicht zahlenmäßig berechnen.

Die Mehrzahl der beteiligten Forscher, mag auch der einzelne die Bedeutung der Kohlensäure für die Klimabildung höher

¹ Dies Verhalten ist jedoch nicht auf die Kohlensäure beschränkt, sondern zeigt sich bei jeder Art von Absorption, wie mir Herr Geheimrat WINKELMANN erklärte.

² Vergl. S. A. ARRHENIUS, Lehrbuch der kosmischen Physik. Leipzig 1903. p. 170. Herr Dr. v. D. BORNE machte mich auf diese sehr wichtige Stelle aufmerksam.

oder geringer einschätzen, steht doch wohl¹ auf dem Standpunkte, daß eine größere Schwankung im Kohlensäuregehalt der Atmosphäre nicht ohne Einfluß auf die Erdtemperatur bleiben könne. Die Möglichkeit aber, daß der Kohlensäuregehalt der Luft in früheren Erdperioden sich weit von dem heutigen Werte nach oben oder unten entfernte, wird man ohne weiteres nicht bestreiten können.

Kohlensäure wird andauernd verbraucht, d. h. aus der Atmosphäre entnommen und der festen Erdkruste einverleibt, teils bei der Zersetzung von Silikaten, teils bei der Anhäufung fossiler Brennstoffe. Erneuert wird jedoch der Kohlensäuregehalt der Luft im wesentlichen nur durch die Massen, die im Zusammenhange mit vulkanischen Vorgängen dem Inneren der Erde entströmen. Es ist nun durchaus unwahrscheinlich, daß Verbrauch und Zufuhr sich stets die Wage halten, der Kohlensäuregehalt der Luft wird also ziemlich sicher in vergangenen Erdperioden geschwankt haben. Man darf annehmen, daß die Kohlensäure zu Zeiten, in denen die vulkanische Tätigkeit eine sehr lebhaft war, hohe Beträge erreichte, in anderen Perioden, in denen die Produktion stockte, aber stark zurückging. Wenn aber in Zeiten mit stärkerem Vulkanismus sich die Temperaturen an der Erdoberfläche erhöhten, so wird man diese Verbesserung des Klimas wohl in erster Linie auf das Konto der atmosphärischen Kohlensäure setzen dürfen. FRECH glaubt nun, den Nachweis führen zu können,

¹ Neuerdings ist von gewichtiger Seite die Behauptung aufgestellt worden, die Kohlensäure der Atmosphäre habe überhaupt keinen nennenswerten Einfluß auf das Klima an der Erdoberfläche. In einer umfangreichen Arbeit, die sich mit der Sonnenausstrahlung beschäftigt (Annals Astrophysical Observatory, Smithsonian Institution. 2. 1908. p. 172), schreiben ABBOT und FOWLE: „Its (carbonic acid gas) effect is merely to increase slightly the altitude of the layer which transmits radiation of two narrow spectral bands to space, and thus to decrease the temperature at which these wave-lengths are finally emitted. It therefore does not appear possible that the presence or absence, or increase or decrease, of the carbonic-acid contents of the air are likely to appreciably influence the temperature of the earth's surface.“ — Ich muß die endgültige Lösung dieser Frage den auf diesem Gebiet arbeitenden Physikern überlassen und gehe hier von der mir persönlich sehr wahrscheinlichen Voraussetzung aus, daß ein wechselnder Kohlensäuregehalt der Atmosphäre die Erdtemperaturen beeinflusst, wenn auch diese Wirkung mit quantitativer Genauigkeit nicht festzustellen ist.

daß lebhaftere Vulkantätigkeit und hohe Temperaturen in vergangenen Erdperioden stets zusammenfallen. Er sieht daher den Kohlensäuregehalt der Atmosphäre als einen klimatischen Faktor von allergrößter Wichtigkeit an. Ich kann ebensowenig wie KOKEN die von FRECH gesehene Parallelität zwischen Vulkanismus und Erdtemperaturen in vergangenen Erdperioden erkennen. Dies aber führt mich zu der Auffassung, daß für die geologischen Klimaschwankungen der Kohlensäuregehalt der Atmosphäre zwar nicht gänzlich ohne Bedeutung ist, an Wichtigkeit zurücktritt aber gegenüber einer anderen, bisher noch nicht genauer bekannten Ursache.

Es soll die Aufgabe der folgenden Zeilen sein, die hier vertretene Anschauung im einzelnen zu belegen.

2. Die untercambrische Vereisung.

Die beste Übersicht über die Frage, ob Vulkanismus und Temperaturen einander parallel verlaufen, erhält man, wenn man die großen Klimaschwankungen der geologischen Vergangenheit in ihrer chronologischen Reihenfolge durchmustert.

Die älteste Vereisung, die mit Sicherheit nachgewiesen zu sein scheint, ist die untercambrische. FRECH (l. c. 1908. p. 77) hält ihr Auftreten in China für möglich, glaubt aber, daß die aus Südaustralien beschriebenen Vereisungserscheinungen als pseudoglazial zu deuten und auf tektonische Einwirkungen zurückzuführen seien. Was bisher durch HOWCHIN¹ und DAVID², über die untercambrische Vereisung Südaustraliens bekannt geworden ist, stützt FRECH'S Ansicht in keinem Punkte. Daß die untercambrischen Glazialbildungen keine Reibungsbreccien sind, geht schon aus ihrer Mächtigkeit hervor, die 1500' erreicht. Außerdem werden die ungeschichteten, moränenartigen Bildungen durch regelmäßige Einlagerungen von geschichtetem Material, Quarziten, feinschieferigen Gesteinen und Kalken unterbrochen, deren Anwesenheit unerklärbar wäre,

¹ W. HOWCHIN, Glacial Beds of Cambrian Age in South Australia. Quart. Journ. 64. 1908. p. 234.

² T. W. E. DAVID, Conditions of Climate at Different Geological Epochs etc. Congrès Géolog. Internat. Compt. rend. 10. Sess. Mexiko. p. 437.

wenn der uralte boulder-clay eine Reibungsbreccie darstellte oder als Material von Erdbeben und Muren aufzufassen wäre. Am stärksten spricht aber gegen pseudoglaziale Herkunft und Kritzung der Geschiebe die Beobachtung, daß sie weder aus dem unmittelbar Liegenden noch Hangenden des boulder beds stammen, sondern echt erratisch sind. HOWCHIN (l. c. p. 240) sagt darüber: „None of the boulders found in the till are of local origin.“ Einige Geschiebe sind von wohlbekanntem präcambrischen Gesteinen abzuleiten, während bei anderen der Ursprung noch nicht feststeht.

Muß man aus diesen Gründen den tektonischen Ursprung der untercambrischen boulder beds unbedingtablehnen, so spricht auf der anderen Seite der Habitus der einzelnen Geschiebe wie der des gesamten Gesteins sehr deutlich für glaziale Entstehung. Die auf HOWCHIN's Textfiguren 2—4 und auf Taf. XIX abgebildeten Geschiebe dürften von diluvialen Grundmoränengeschieben nicht zu unterscheiden sein und die auf den Taf. XXII und XXIV dargestellten Bilder des untercambrischen Geschiebemergels kann man ruhig in ein Werk über diluviale Vereisung einschmuggeln, ohne daß von irgendeiner Seite Einspruch erhoben werden wird.

Eine untercambrische Vereisung scheint mir also in Südaustralien und ebenso wohl auch in China festgestellt zu sein. Jedoch dürfte die Frage, ob sich gleichzeitig mit ihr ein Nachlassen der vulkanischen Tätigkeit einstellt, kaum zu beantworten sein. FRECH weist allerdings und mit Recht darauf hin, daß das uns bekannte fossilführende Cambrium arm an vulkanischen Effusivgesteinen ist. Allein wir dürfen mit Sicherheit annehmen, daß cambrische Gesteine in großer Ausdehnung metamorphosiert worden sind. Gerade aber die Gebiete, in denen später Metamorphismus eintrat, gehörten zu den unruhigsten Teilen der Erdoberfläche und wurden wahrscheinlich auch im Cambrium von Vulkanausbrüchen nicht verschont. Nun spielen aber in Gesteinen, die man für metamorphes Cambrium halten könnte, Hornblendegesteine, die nach der herrschenden Anschauung aus basischen Eruptivgesteinen hervorgegangen sind, und Porphyroide, d. h. metamorphe Porphyre, eine recht bedeutende Rolle. Es ist daher recht wohl möglich, daß auch im Cambrium der Vulkanismus ziemlich lebhaft war, sich aber im allgemeinen auf die Re-

gionen beschränkte, die später der Schauplatz bedeutender Krustenbewegungen waren. Sichere Beweise für oder gegen FRECH's Anschauung werden wir aber aus einer so alten und unvollständig bekannten Formation, wie sie das Cambrium ist, überhaupt nicht ableiten können.

3. Die jungpaläozoische Vereisung.

Über die weitere Klimaentwicklung im älteren Paläozoikum ist wenig bekannt. Zwar wird bisweilen von einer silurischen und einer devonischen Vereisung gesprochen, allein FRECH (l. c. 1908, p. 77) behauptet, daß diese nirgends nachzuweisen seien. Im großen ganzen mag FRECH hier recht haben; immerhin wird man aber nicht vergessen dürfen, daß die Vereisungserscheinungen im unterdevonischen Tafelbergsandstein des Pakhuispasses, Kapkolonie, von einwandfreien und mit den Dingen sehr vertrauten Forschern beobachtet worden sind. Ich möchte deshalb annehmen, daß hier echtes Glazial vorliegt, weitere Schlüsse aus diesem einen isolierten Vorkommen abzuleiten ist aber wohl voreilig.

Außerordentlich viel genauer und ausgedehnter sind jedenfalls unsere Kenntnisse von der jungpaläozoischen Vereisung. KOKEN und FRECH setzen sie ins untere Perm, und ich habe keinen Grund, dieser Auffassung entgegenzutreten. FRECH sagt nun: „Von einer Gleichzeitigkeit der Vulkanausbrüche und der dyadischen Vereisung kann weder im Norden noch im Süden der Erde auch nur im entferntesten die Rede sein.“

Schon die Verhältnisse in Australien scheinen dieser so zuversichtlich ausgesprochenen Behauptung FRECH's zu widersprechen. Auf dem von FRECH selbst publizierten Profile¹ schalten sich nämlich zwischen die unteren und oberen Glazialschichten in Neu-Süd-Wales tuffartige Schiefer, Sandstein, Konglomerate und Andesite ein. Wenn man also, wie FRECH dies tut, beide Glazialhorizonte in das Unterrotliegende stellt, so ist damit bewiesen, daß in Australien dasselbe Formationsglied Glazialbildungen und vulkanische Gesteine beherbergt.

¹ l. c. 1908. Taf. VI. Daß die Kohlschichten unter V¹ und V² als „niemals mit Eiszeiten zusammenfallende Massenausbrüche“ bezeichnet werden, ist wohl nur ein lapsus calami.

Aber auch auf der Nordhemisphäre ist das Unterrotliegende keineswegs frei von vulkanischen Produkten. So gehören ihm die zahlreichen und recht ergiebigen Eruptionen der Gehrener Schichten im Thüringer Walde an. Zum Unterrotliegenden zu rechnen sind aber auch die beiden mächtigen und ausgedehnten Quarzporphyrdecken der Hallenser Gegend und die sie trennenden Tuffe. Auch hier handelt es sich keineswegs um ganz unbedeutende Ausbrüche. Nach v. FRITSCH¹ ist die Lavamasse, die den unteren Hallenser Quarzporphyr bildete, auf etwa 80 cbkm zu schätzen und entspricht etwa der, die im Jahre 1786 vom Skaptar Jökul auf Island ausgestoßen wurde.

Wahrscheinlich fällt aber auch noch ein Teil der südtiroler und ostlombardischen Porphyrausbrüche in das Unterrotliegende; darauf deutet wenigstens das von FRECH² angeführte, von SUESS beschriebene Profil der Val Trompia.

FRECH's³ Behauptung, daß Vereisungserscheinungen und Vulkantätigkeit im Unterrotliegenden nicht gleichzeitig aufträten, entbehrt also der tatsächlichen Begründung. Richtig dürfte vielmehr sein, daß die im Oberkarbon noch ziemlich unbedeutende Vulkantätigkeit sich im Unterrotliegenden steigert und im Mittelrotliegenden ihr Maximum erreicht. Die Kurve des Vulkanismus steigt also, wie es scheint ohne Unterbrechung, vom Oberkarbon bis zum Mittelrotliegenden an, die Temperaturkurve aber scheint sich im Unterrotliegenden zu senken und erst im Mittelrotliegenden wieder zu steigen. Hier „koinzidiert also offensichtlich der Eintritt der Vereisung mit gesteigerter vulkanischer Tätigkeit,“ wie KOKEN und ich im Gegensatz zu FRECH behaupten.

Auch die Klimaentwicklung am Schlusse der paläozoischen Ära scheint FRECH nicht recht zu geben. Für den Zechstein nimmt FRECH an „Erneutes Herabgehen der Wärme. (Man denke an die arktische Transgression des europäischen Zechsteinmeeres.)“ Diese Abkühlung wird mit dem Erlöschen der rotliegenden Vulkane in Zusammenhang gebracht.

¹ Vergl. WÜST, Erdgeschichtliche Entwicklung des östlichen Harzvorlandes. Halle a. S. 1908. p. 24.

² Lethaea palaeozoica. 2. 548.

³ F. FRECH, Studien über das Klima der geologischen Vergangenheit. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. 1906. p. 541.

Nun brauchte ein von Norden her transgredierendes Meer selbst in dem unmittelbar von ihm betroffenen Gebiete noch keine wesentliche Abkühlung hervorzurufen, wenn dies Meer, was wahrscheinlich der Fall war, ziemlich hohe Temperaturen besaß. Auf keinen Fall aber kann eine lokale Transgression auf der Nordhemisphäre eine allgemeine Temperaturherabsetzung auf der ganzen Erde zur Folge haben.

Auch die Verbindung von Abkühlung und Wüstenklima, wie sie FRECH für die oberste Dyas annimmt, kommt mir nicht sehr wahrscheinlich vor. „Während der jüngsten Dyas folgt in der Nordhemisphäre die mit einem erneuten Temperaturniedergang verbundene Wüstenzeit auf die langsam erlöschende Bildung der Steinkohlenflöze.“ Plausibler erscheint mir hier die wohl allgemein verbreitete Anschauung, nach der sich die Kali- und Magnesia-salze des oberen Zechsteins unter der Einwirkung eines gleichzeitig trockenen und recht heißen Klimas niederschlugen. Das Auftreten¹ von Langbeinit, Löweit und Vanthoffit im Staßfurter Steinsalz läßt Temperaturen von mindestens 37, 43 und 46° annehmen, die Paragenese der beiden letztgenannten Salze, die in Wilhelmshall beobachtet wurde, spricht für eine Bildungstemperatur von mindestens 60°, das Zusammenvorkommen von Kieserit mit Sylvit sogar für mindestens 72°.

4. Die Klimaentwicklung der mesozoischen Ära.

Die mesozoische Ära ist nach FRECH's Darstellung in der *Lethaea Mesozoica* vom Jahre 1903 „eine Zeit fast vollkommenen Erdfriedens in tektonischer Beziehung; in vulkanologischer Hinsicht sind nur räumlich und zeitlich lokalisierte Eruptionen zu verzeichnen.“

Nun haben sich in den letzten 5 Jahren unsere Kenntnisse der mesozoischen Formationen ausgedehnt und dadurch ist auch eine Anzahl von Eruptivgesteinen nachgewiesen worden, die vorher nicht oder nur unvollständig bekannt waren. Trotzdem bleibt es sehr zweifelhaft, ob dieser Zuwachs bereits ausreicht, um FRECH's Behauptung aus dem Jahre 1903 in ihr Gegenteil zu verwandeln. Als sicher bleibt doch bestehen, daß weite Gebiete, wie das ganze

¹ ERDMANN, Chemie und Industrie der Kalisalze, p. 74 in Deutschlands Kalibergbau. Berlin 1907.

außeralpine Mittel- und Westeuropa, die im Jungpaläozoicum und Tertiär der Schauplatz einer sehr lebhaften Vulkantätigkeit waren, von mesozoischen Ausbrüchen nicht betroffen wurden. Dazu kommt noch etwas anderes. Gerade im Mesozoicum werden ungeheure Massen von CO_2 an Kalk oder Magnesia gebunden und damit der Atmosphäre entzogen. Die Ausstoßung von vulkanischer Kohlensäure hätte also schon recht intensiv sein müssen, nur um diese Verluste der Atmosphäre zu decken. Es wird daher stets große Schwierigkeiten bereiten, zur Erklärung des warmen Klimas im Mesozoicum vulkanische Kohlensäureexhalationen heranzuziehen.

Am Schlusse des Mesozoicums soll eine Abkühlung stattfinden, die durch die Ausbildung von Klimazonen in der Kreide angezeigt wird. In einem besonderen Kapitel werde ich darzustellen versuchen, daß Klimazonen stets vorhanden sein müssen und sich lediglich verschärfen, wenn die Temperaturen an der Erdoberfläche sinken. Aber auch die Verschärfung der Klimazonen ist, wie zu zeigen sein wird, nur sehr schwer und unsicher zu erkennen, wenn man sich lediglich auf tiergeographische Momente berufen kann. So glaube ich, daß in der Kreide die Klimazonen nur deswegen deutlicher hervortreten, weil sthenotherme Formen in der Fauna eine überwiegende Rolle spielen, daß man aber noch keineswegs eine erhebliche Verschlechterung des Klimas annehmen darf.

Nach der Auffassung von FRECH führt die Klimaverschlechterung in der jüngsten Kreidezeit sogar zu einer Vereisung, von der Anzeichen in Südastralien entdeckt sein sollen. Nach der zusammenfassenden Darstellung, die DAVID¹ von den fraglichen Ablagerungen gibt, handelt es sich im wesentlichen um erratische Blöcke, bisweilen auch um „till“ und konglomeratische Sandsteine, die auf einem Horizont der oberen Kreide aufliegend gefunden werden. Zunächst dürfte es nach der Anschauung von DAVID durchaus nicht sicher sein, daß die geröllführenden Schichten und isolierten Geschiebe einem cretaceischen Horizonte angehören, sie können mit dem gleichen Rechte als tertiär gedeutet werden.

¹ T. W. EDGEWORTH DAVID, Conditions of Climate at different geological epochs, with special reference to glacial epochs. Congrès géologique international. Compte rendu de la X^{me} session. Mexiko 1906. p. 437.

Dann aber ist es sehr wahrscheinlich, daß die Gerölle nicht auf sekundärer, sondern tertiärer Lagerstätte sich befinden, d. h. daß sie aus unterkambrischen oder jungpaläozoischen Glazialschichten ausgewaschen worden sind. Es dürfte sich daher empfehlen, weitere Mitteilungen über die fraglichen Bildungen abzuwarten und so lange ein „non liquet“ auszusprechen, als die australischen Geologen selbst noch nicht von der glazialen Entstehungsweise und dem obercretaceischen Alter dieser Bildungen völlig überzeugt sind.

Auch von der Nordhemisphäre werden glaziale Züge aus der obersten Kreide erwähnt. So sollen vereinzelte Gerölle, die sich in der Schreibkreide von England finden, durch Eis transportiert worden sein. Demgegenüber ist aber zu bemerken, daß auch auf anderem Wege exotische Gerölle über den Meeresgrund verstreut werden können. Gerölle bis zur Größe einer Haselnuß und noch etwas darüber finden sich nicht selten im Mageninhalt von See- hunden und Seevögeln; es ist natürlich durchaus denkbar, daß auch schon obercretaceische Wirbeltiere die Gewohnheit angenommen hatten, ihren Magen mit Geröllen vollzustopfen. Größere Geschiebe aber können sehr wohl dem Wurzelwerk von Bäumen, die ins Meer stürzten, angehaftet und zusammen mit dem Treibholz weite Strecken zurückgelegt haben. Schließlich bleibt natürlich auch die Möglichkeit bestehen, daß Schollen von Flußeis oder Meereis, das sich in der Küstenzone bildete, zur Winterszeit die Gerölle ins offene Meer hinausführten. Dies aber kann auch in Gegenden geschehen, die nicht andauernd vereist sind.

Im allgemeinen lassen jedoch die organischen Reste, die wir in der weißen Schreibkreide antreffen, auf ein warmes Meer schließen, wie es heute etwa in der Gegend der Wendekreise existiert. Hier erreichen heutigen Tages die Kokkolithophoriden, die für die Schreibkreide so wichtig sind, das Maximum ihrer Häufigkeit und Individuengröße. Auch die große Mannigfaltigkeit der Foraminiferen, die sich am Aufbau der Schreibkreide beteiligen, spricht mehr für warmes als für kaltes Wasser.

Es liegt der Gedanke verhältnismäßig nahe, die Vernichtung eines großen Teiles der mesozoischen Fauna am Ende der Kreidezeit mit einer schroffen Klimaänderung in Zusammenhang zu bringen. Allein man wird im Auge behalten müssen, daß von dieser wahrscheinlich die Pflanzenwelt nachhaltiger betroffen worden wäre

als die Tierwelt. Ein Tier findet sehr mannigfaltige Mittel und Wege, sich den Einwirkungen eines ungünstigen Klimas zu entziehen. Es hat vielfach die Möglichkeit, Wanderungen auszuführen, sich in die Erde einzugraben, scheint sich auch im allgemeinen leichter einem rauheren Klima anzupassen als die Pflanze.

Diese ist plötzlichen Klimaänderungen gegenüber viel wehrloser als das Tier, weil sie nicht die Möglichkeit besitzt, sich aktiv fortzubewegen. Ihre Wanderungen werden daher im allgemeinen nur langsam vor sich gehen und oft schon von Hindernissen aufgehalten werden, die von Tieren leicht überschritten werden. Besonders empfindlich sind im allgemeinen die Pflanzen des marinen Planktons gegen Veränderungen der Temperatur (und auch des Salzgehaltes). Sie können aus den Strombezirken, in denen sie leben, nicht herausgelangen, können auch nicht, wie manche Tiere, zeitweilig den Rückzug in die Tiefe antreten und sind daher dem Tode geweiht, wenn sich die physikalischen Bedingungen in den Oberflächenschichten des Meeres ändern.

Aus allen diesen Momenten scheint hervorzugehen, daß die Pflanzenwelt gegen Klimaänderungen im allgemeinen viel empfindlicher sein dürfte als die Tierwelt. Wenn durch eine klimatische Katastrophe ein Teil der Organismenwelt auf der Erde zerstört wird, so werden zunächst wohl erst die Pflanzen betroffen, durch deren Zerstörung dann die Pflanzenfresser und schließlich auch die Fleischfresser, die sich von diesen nähren. Tritt eine klimatische Katastrophe ein, so dürfte nur ein kleinerer Teil der vernichteten Tierwelt erfrieren, der größere verhungert wahrscheinlich. Es wäre durchaus denkbar, daß das Aussterben der großen Meeresreptilien am Schlusse der Kreidezeit dadurch hervorgerufen wurde, daß das marine pflanzliche Plankton teilweise zerstört wurde.

Leider ist von dem pflanzlichen Plankton der Kreidemeere mit Ausnahme der recht eurythermen Kokkolithophoriden und einiger Diatomeen wohl nichts bekannt; über eine klimatische Katastrophe können wir also hier nichts erfahren.

Hingegen sehen wir, daß die Landflora sich in der Spanne zwischen oberer Kreide und Tertiär nur außerordentlich wenig ändert. Der Rückgang oder das Aussterben der altmesozoischen Typen, das Auftreten der modernen Dicotyledonen hat sich bereits im Laufe der unteren Kreide vollzogen. Die Flora der oberen Kreide

steht der heutigen unendlich viel näher als die obercretaceische Tierwelt der modernen Fauna. In der Flora der oberen Kreide herrschten schon wie heute die Dicotyledonen vor; auf dem Boden Nordamerikas und Mitteleuropas wuchsen schon damals Pappeln, Buchen, Kastanien, Platanen, Weiden, Efeu, denen sich Magnolien, Tulpenbäume, Zimtbäume und der Lorbeer beimgen. Die Flora läßt also nichts von der Katastrophe erkennen, welche die Kreidefauna betroffen hat, wir dürfen daher klimatische Momente wohl dabei ausschalten.

5. Klima der Tertiärperiode.

Nach FRECH umfaßt die Tertiärzeit zwei Höhepunkte vulkanischer Tätigkeit, die im Untereocän und im unteren bis mittleren Miocän liegen; in diese Perioden sollen aber auch die Temperaturmaxima an der Erdoberfläche fallen.

Daß die vulkanische Tätigkeit zu Beginn des Tertiärs sehr kräftig einsetzt, kann FRECH durch einen Hinweis auf den Dekkan-Trapp und auf gleichaltrige Eruptionen in Sumatra, Abessinien, Vorderasien und im westlichen Nordamerika belegen. Für seine Behauptung aber, daß nach einer Abkühlung in der obersten Kreidezeit eine Wiedererwärmung zu Beginn des Tertiärs eintritt, bleibt uns FRECH den Beweis schuldig. Für diese Frage sind die Faunen nicht wohl verwendbar, weil sie diesselts und jenseits der Kreide-Eocängrenze einander zu unähnlich sind. Die Floren aber, die in oberer Kreide und im Eocän einander recht ähnlich sind, sprechen nicht zugunsten von FRECH. Weder läßt sich aus ihnen für die obere Kreide eine Abkühlung noch für das Eocän eine stärkere Erwärmung ableiten. Wenn sich überhaupt aus diesen beiden Floren ein klimatologischer Schluß ziehen läßt, so ist es der, daß die Zeit der oberen Kreide etwas wärmer war als die des Eocän, daß also der Abkühlungsprozeß, der das gesamte Tertiär beherrscht und schließlich zur diluvialen Eiszeit führt, schon an der Grenze von Kreide und Tertiär einsetzt.

Noch klarer liegen die Verhältnisse im Miocän. Daß die eruptive Tätigkeit hier in vielen Gebieten ihren Höhepunkt erreicht, wird niemand leugnen. Wohl aber wird es nicht allzuviel geben, die gleich FRECH für das Oligocän eine Abkühlung, für das Miocän eine Wiedererwärmung annehmen. Dafür sprechen

die reichen Tertiärfloren eine zu beredte Sprache. Ein Werk, dem man weder einen veralteten Standpunkt noch Voreingenommenheit in dieser Frage vorwerfen kann, nämlich das Handbuch des deutschen Braunkohlenbergbaus urteilt über die Tertiärfloren und die aus ihnen sich ableitenden klimatologischen Folgerungen wie folgt¹: „Die Eocänflora weist in Zentraleuropa eine große Anzahl mehr oder minder tropischer Formen auf, z. B. *Gingko*, *Dammara*, *Cryptomeria*, Fächer- und Fiederpalmen, das mit tropischen Eichen verwandte *Dryophyllum*, *Devalquea*, Aralien, Lauroceen und Menispermaceen. — Im Oligocän sind auch in Zentraleuropa schon eine Reihe von Pflanzen vorhanden, deren heutige Verwandte nicht in den Tropen zu Hause sind; jedoch finden sich z. B. Palmenreste noch südlich der Ostseeregion. — In der Miocänflora Zentraleuropas sind immer noch wenigstens subtropische Elemente vorhanden. — Die mehr tropischen Arten sind jedoch weiter nach Süden gerückt, als im Oligocän; so finden sich Palmen nur in Südeuropa, nördlich der Alpen aber nicht mehr, ebenso die Cycadaceen, deren letzte europäische Vertreter im Miocän leben. — Auch innerhalb des Miocäns selbst ist der Rückgang tropischer Arten zu bemerken, denn im Untermiocän sind Typen, die nach den Tropen weisen, häufiger als im Obermiocän, in dem sie nur noch ausnahmsweise vorkommen.“ Im Pliocän weisen hingegen die Florenbestandteile, besonders aber das völlige Fehlen von Palmen, auf ein „erheblich gemäßigter gewordenes Klima“ hin.

FRECH stützt sich mit seiner Anschauung im wesentlichen auf die geographische Verbreitung der Braunkohlen. Die Braunkohlenzone, deren Zentrum im Unteroligocän die Hallenser Gegend darstellt, wandert im Oberoligocän nach Südeuropa und kehrt erst im Miocän in das nördliche Deutschland wieder zurück. Ich möchte allerdings ebenso wie FRECH annehmen, daß das fast völlige Fehlen der unteroligocänen, die weite Verbreitung der oberoligocänen Braunkohlen in Südeuropa auf klimatische Momente zurückzuführen ist. Im Unteroligocän war das südeuropäische Klima wohl noch zu heiß² für die Konservierung der Braunkohlenmoore,

¹ G. KLEIN, Handbuch für den deutschen Braunkohlenbergbau. Halle 1907, p. 46.

² Diese Anschauung stützt sich auf die Auffassung, daß Torfmoore der Tropenzone fehlen, Kohlenflüze sich also im allgemeinen in einem

erst als sich die Mitteltemperaturen im Oberoligocän um etwa 2° erniedrigt hatten, konnten sich Flöze bilden. Wenn im Miocän des norddeutschen Tieflandes sich wieder eine sehr lebhaft Braunkohlenbildung einstellte, so liegt dies aber wohl daran, daß durch den Rückzug des Oligocänmeeres auf weite Strecken jungfräulicher Tieflandsboden entblößt worden war, der für das Wachstum und die Fossilisation einer reichen Flora die günstigsten Bedingungen bot; das Fehlen von miocänen Braunkohlenbildungen weiter im Süden kann aber sehr wohl mit der fortschreitenden Gebirgsbildung zusammenhängen, durch welche die Abtragungsgebiete stark vergrößert, die Akkumulationsgebiete, in denen allein wir natürlich Kohlenflöze erwarten dürfen, aber reduziert wurden.

Die tertiären Floren nötigen unbedingt zu dem Schlusse, daß die Temperaturen an der Erdoberfläche allmählich vom Eocän bis zum Pliocän gesunken sind; dieser Auffassung widerspricht die geographische Verteilung der Braunkohlen in den einzelnen Formationsabschnitten nicht. Die Temperaturkurve senkt sich also während der gesamten Tertiärzeit, wie es scheint, ziemlich gleichmäßig. Die Kurve des Vulkanismus aber erreicht zwei Höhepunkte, die im Untereocän und im Unter- bzw. Mittelmiocän liegen. Daraus geht die Unmöglichkeit hervor, die Klimaentwicklung im Tertiär ausschließlich aus der vulkanischen Tätigkeit abzuleiten.

6. Die quartäre Eiszeit.

Nach der hier vertretenen Anschauung bedeutet die quartäre Eiszeit nichts anderes als den Höhepunkt eines Abkühlungsprozesses, der bis an die obere Grenze der Kreide zurückreicht und das ganze Tertiär beherrscht. Wahrscheinlich setzt sich die Abkühlung im Quartär selber, wenngleich hier durch wärmere Perioden

gemäßigten Klima gebildet haben. Jedoch gilt dieser Satz nicht mehr ohne Einschränkung. So hat in neuester Zeit WICHMANN auf ausgedehnte Torfmoore in Java, Sumatra, Borneo und Neu-Guinea aufmerksam gemacht. *The fens of the Indian Archipelago.* Kgl. Akad. Wetensch. Amsterdam 1909. p. 70.

unterbrochen, weiter fort, denn die Mitteltemperaturen am Schluß der quartären Eiszeit liegen nach allgemeiner Annahme erheblich tiefer als an ihrem Beginne.

FRECH leugnet nicht, daß der diluvialen Vereisung am Schlusse der Tertiärperiode eine Abkühlung vorausgeht, sie soll aber erst im Obermiocän beginnen. „Trotz dieser Vorbereitung ist dann der Eintritt der jüngsten Vereisung ziemlich plötzlich erfolgt.“ Als Ursache der diluvialen Eiszeit wird ein starker Rückgang der vulkanischen Tätigkeit angesehen. „Das Albaner Gebirge ist der einzige größere Vulkan, dessen Ausbrüche wesentlich während der Eiszeit erfolgt sind,“ schreibt FRECH im Jahre 1902. Seither hat er seine Ansicht etwas geändert und läßt im Jahre 1908 als „Ausnahmen quartärer Vulkane“ gelten: Island, einen Teil der Vulkane in Java und Sumatra und schließlich das Albanergebirge. Auch das ist noch nicht besonders viel, wenn man an die große Menge der rezenten und die noch größere der tertiären Vulkane denkt.

Ohne Zweifel ist die Zahl der quartären Vulkanausbrüche, deren Alter sich mit Sicherheit feststellen läßt, sehr viel größer, als FRECH annimmt. Nach einer neuen Darstellung von CHAMBERLIN und SALISBURY¹ enthält das westliche Nordamerika zahlreiche Lavaströme und Schlackenkegel von quartärem Alter, die sich auf die Staaten Neu-Mexiko, Kolorado, Utas, Nevada, Oregon, Idaho, Washington und auf viele Punkte in den Sierren verteilen. Nach GILBERT sind von 250 Lavaströmen in diesen Staaten 15 %, von 350 Vulkankegeln aber 61 % im Quartär entstanden. Vulkanische Aschen wechsellagern mit Löß vielfach im östlichen Washington und im Oregon und überlagern Moränen in einigen Teilen von Alaska. Aber auch damit ist die Zahl der quartären Vulkanausbrüche höchst wahrscheinlich noch lange nicht erschöpft.

Nach FRECH läßt die äußere Form eines Vulkanberges stets erkennen, ob seine Eruptionen dem Diluvium oder Postdiluvium angehören. Dies ist wohl sicher richtig, wenn der Vulkan seine Tätigkeit bereits im Diluvium eingestellt hat. Wenn er aber später noch tätig gewesen ist, so kann seine heutige Form zwar einer sehr späten Periode entstammen, in ihrem Inneren aber sehr viel älteres Material verbergen. Kann man mit Sicherheit be-

¹ Geology. New York 1907. 3. 479.

haupten, daß die riesige Vulkankette der süd- und mittelamerikanischen Kordillere in der Pleistocänzeit keine Eruptionen gehabt hätte? Wer kann heute dafür den Beweis liefern, daß Popocatepetl und Pic von Orizaba, Chimborazo und Aconcagua unter einem Mantel von rezentem Eruptionsmaterial keinerlei pleistocänes verstecken?

Noch viel ungünstiger für die Altersbestimmung liegen meist die Dinge, wenn sich die Ausbruchsstellen nicht auf den Kontinenten oder großen Kontinentalinseln sondern mitten in den Weltmeeren befinden. Wer sich einmal der Aufgabe gegenüber gesehen hat, das Alter jungvulkanischer Inselgesteine bestimmen zu müssen, weiß nur zu gut, wie wenig Positives sich in den meisten Fällen sagen läßt. Ein Beispiel, einem der am besten bekannten Vulkaneiländer entnommen, möge genügen. Die Insel St. Paul im Indischen Ozean besteht im wesentlichen aus dünnen basaltischen Lavaströmen, nur an einer Stelle treten saure Eruptionsprodukte unter den basischen zutage. Die zahlreichen Basaltströmchen und die sie häufig trennenden Aschen, Tuffe und Agglomerate sind vorzüglich aufgeschlossen und an vielen Stellen zugänglich. Wiewohl die Insel sehr genau von v. HOCHSTETTER und VÉLAIN untersucht worden ist, war es aber bisher ganz unmöglich, das Alter der Eruptionen auch nur annähernd festzustellen; man weiß nur, daß ihre Gesteine der jungvulkanischen Sippe angehören, ob sie aber tertiär, diluvial oder alluvial sind, läßt sich nicht entscheiden. Was aber hier für die St. Paulsinsel gilt, kann man mit dem gleichen Rechte von Hunderten anderer ozeanischer Eilande sagen.

FRECH'S Behauptung, die vulkanische Tätigkeit habe während des Diluviums fast völlig ausgesetzt, läßt sich weder beweisen noch völlig widerlegen. Man ist hier mehr auf allgemeine Eindrücke beschränkt, diese aber legen die Annahme nahe, daß zur Zeit des Diluviums die eruptive Tätigkeit lebhafter war als heute. Traten doch während des Diluviums vereinzelt noch in den mitteleuropäischen Vulkangebieten Eruptionen auf, während sie später nicht mehr stattfanden; hier wenigstens fehlt ganz sicher die von FRECH angenommene Wiederbelebung der Vulkantätigkeit, durch welche die diluviale Eiszeit ihr Ende gefunden haben soll.

FRECH stützt sich im übrigen auch darauf, daß den meisten Glazialablagerungen nur wenig vulkanisches Material beigemischt

ist. Wie weit dies für die Südhemisphäre, z. B. Patagonien und Neu-Seeland seine Geltung hat, lasse ich dahingestellt. Zweifellos hat aber dieser Satz für die Glazialsedimente der Nordhemisphäre seine Berechtigung. Aber gerade hier wurden vornehmlich solche Gebiete von der quartären Vereisung betroffen, in denen sich entweder im Tertiär überhaupt keine Vulkantätigkeit entwickelt hatte oder in denen sie lange vor Eintritt der diluvialen Vereisung erloschen war. Gerade viele von den Zentren und Hauptverbreitungsgebieten des diluvialen Inlandeises haben nie jungvulkanische Ausbrüche gesehen; man denke nur an das nordöstliche Nordamerika, Finland, Rußland, Norddeutschland und den größten Teil von Skandinavien. In dem einzigen nordischen Gebiete von größerem Umfang, in dem auch heute noch Vulkane tätig sind, nämlich in Island, schwiegen auch während der Eiszeit die vulkanischen Kräfte nicht.

So gelange ich denn zu dem Schlusse, daß sich ein fast völliges Versagen der vulkanischen Tätigkeit zur Zeit des Diluviums nicht einmal wahrscheinlich machen, geschweige denn beweisen läßt. Ich möchte annehmen, daß die vulkanischen Ausbrüche im Diluvium zwar schwächer und weniger zahlreich als im Tertiär, aber stärker und weiter verbreitet als in der Postglazialzeit waren. Auf keinen Fall aber gibt der Vulkanismus einen sicheren Baugrund für eine Erklärung der jüngsten Eiszeit ab.

Zusammenfassung.

FRECH gelangt zu dem Schlusse: „Jede Eiszeit fällt mit dem völligen oder annähernd völligen Aufhören der vulkanischen Tätigkeit zusammen; jeder Höhepunkt vulkanischer Ausbrüche schließt Eiszeiten aus.“

Ich hoffe, auf den vorhergehenden Seiten bewiesen zu haben, daß FRECH's Behauptung der genügenden Begründung entbehrt.

Für die untercambrische Vereisung läßt sich wenig aussagen. Die jungpaläozoische Vereisung fällt nicht mit einem Aufhören, sondern mit einer Steigerung der vulkanischen Tätigkeit zusammen. Der diluvialen Vereisung läuft allerdings eine Abschwächung der

vulkanischen Erscheinungen (gegenüber dem Tertiär) parallel, aber ihr folgt meines Erachtens keine Wiederbelebung in post-diluvialer Zeit, welche der jüngsten Eiszeit ein Ende bereitet haben soll. Wahrscheinlich ist in Tertiär und Diluvium Erwärmung und Abkühlung ziemlich unabhängig von den vulkanischen Ereignissen; denn die diluviale Eiszeit ist nichts anderes als der letzte Akt eines Abkühlungsprozesses, der das ganze Tertiär überdauert und der von dem Höhepunkte vulkanischer Tätigkeit im Miocän nicht berührt wird. Wenn das Oligocän bereits die Temperaturen des Pliocäns gehabt hätte, so wäre, entgegen der Ansicht von FRECH, zweifellos schon im Miocän eine Vereisung aufgetreten.

Die uns besser bekannten Eiszeiten treten in Perioden auf, in denen der Vulkanismus zwar nicht sein Maximum erreicht aber doch recht rege ist. Hingegen bringt ein Nachlassen der vulkanischen Kräfte, wie wir es für das Mesozoikum annehmen müssen, keine erkennbare Herabsetzung der Temperaturen an der Erdoberfläche hervor.

Ich gehe nicht so weit, wie ARLDT¹, der FRECH gerade entgegengesetzt behauptet, daß die Vereisungen durch Vulkanausbrüche hervorgerufen worden sind. Ich leugne nur, daß sich der von FRECH behauptete Parallelismus zwischen den Kurven des Vulkanismus und der Temperatur durch geologische Daten beweisen oder auch nur wahrscheinlich machen läßt.

Dabei möchte ich aber nicht in Abrede stellen, daß die Kohlen-säure der Atmosphäre einen klimatologischen Faktor von veränderlicher Größe darstellt. Nur ist seine Bedeutung für die Klimabildung in der Vorzeit gering und wird maskiert von anderen, wichtigeren, wahrscheinlich kosmischen Faktoren.

7. Die Erklärung der permischen Vereisung.

Die permische Vereisung hat man auf dreierlei verschiedenen Wegen zu erklären versucht.

Erstens hat man eine Verschiebung des Südpoles bis in die Mitte des Indischen Ozeans angenommen. Zweitens hat man die

¹ ARLDT, Die Entwicklung der Kontinente. Leipzig 1907. p. 494.

Ansicht aufgestellt, die Vereisung sei keine allgemeine und nicht von wesentlich erniedrigter Temperatur begleitet gewesen, sondern habe sich nur auf morphologisch besonders begünstigte Gebiete beschränkt. Die dritte Anschauung aber spricht von einer allgemeinen Temperaturherabsetzung, die in einzelnen Regionen Vereisung hervorrufen mußte.

Die erstgenannte Hypothese ist durch KOKEN's¹ Ausführungen wohl endgültig widerlegt worden. Auch wenn man sich den Südpol an den denkbar günstigsten Punkt verschoben denkt, so liegen die Gebiete der permischen Vereisung noch sehr weit von ihm entfernt und sämtlich noch außerhalb des Polarkreises. Selbst wenn aber die Regionen, in denen die permische Eiszeit nachgewiesen wurde, dicht beieinander liegen würden, so könnte eine einfache Verschiebung des Erdpols bis in ihre Mitte immer noch nicht als ausreichende Erklärung der Vereisungserscheinungen angesehen werden; denn abgesehen von den wenigen, uns bekannten Eiszeiten waren die Polargebiete der Vorwelt nicht von dauernden Eismassen bedeckt.

KOKEN sieht daher von der Möglichkeit einer Polverschiebung im unteren Perm ganz ab; er glaubt vielmehr die Ursache der Vereisungserscheinungen in der Lage und Gestalt von Festlandsteilen suchen zu dürfen. Hohe Bergländer, die am Rande der Kontinente gelegen waren und sehr reichliche Niederschläge erhielten, bildeten nach KOKEN die Zentren der Vereisung, von denen herab sich breite Eisströme oder Inlandeismassen bis zum Meere ergossen. KOKEN scheint dabei keine wesentliche Herabsetzung der Temperaturen anzunehmen, H. v. STAFF², der sich ihm anschließt, berechnet sogar „für die ganze Dauer der sogenannten ‚permischen Eiszeit‘ ein etwas wärmeres Klima, als es die Gegenwart besitzt.“

Gegen KOKEN's Auffassung habe ich schon früher³ Einwände gemacht, die ich hier nicht wiederholen will. Es läßt sich nicht leugnen, daß auch in niederen Breiten unter sehr günstigen klimatischen Bedingungen und in sehr hochgelegenen Gebieten

¹ E. KOKEN, Indisches Perm und die permische Eiszeit. Dies. Jahrb. Festband 1907. 446.

² H. v. STAFF, Zur Entwicklung der Fusuliniden. Centralbl. f. Min. etc. 1908 p. 700.

³ E. PHILIPPI, Über die permische Eiszeit. Centralbl. f. Min. etc. 1908. p. 353.

größere Eismassen angehäuft werden können. Nur werden sie in tropischen und subtropischen Regionen niemals das Meer erreichen, vorausgesetzt, daß die Temperaturen den heutigen ähnlich sind. Die Niederschläge, welche in den Hochländern der niederen Breiten als Schnee zu Boden sinken und sich dort zu ungeheuren Massen von Gletschereis anhäufen sollen, fallen in tieferen Landstrichen, die das Eis auf seinem Vormarsch zum Meere zu passieren hat, als warmer Regen nieder. Nichts aber zerstört Eis so rasch und so gründlich wie Regen. Eine Steigerung der Niederschläge kann in niederen Breiten die Schneegrenze nicht beliebig, sondern nur bis zu einer ganz bestimmten Minimalhöhe verschieben. Das sieht man z. B. sehr deutlich an Kerguelen; Niederschläge in Gestalt von Regen und Schnee erhält die Insel überreichlich, wenn aber die Gletscher nicht das Meer zu erreichen vermögen, so ist daran nicht in erster Linie Sonne und Wind, sondern der Regen schuld, der in den tiefergelegenen Landstrichen eine rasche Ablation des Eises herbeiführt. Eine stärkere Ausdehnung der Gletscher, wie sie auch auf Kerguelen für das Quartär anzunehmen ist, kann meines Erachtens nicht mehr durch Steigerung der Niederschläge, sondern nur noch durch Herabsetzung der Temperatur erreicht werden. In tropischen und subtropischen Gebieten dürfte aber auch die allerstärkste Steigerung der Niederschläge und die günstigste Gestaltung des Terrains nicht imstande sein, Eismassen bis an das Meer vorzuschieben.

Nun sind aber wahrscheinlich nicht nur Gebiete, die an den Rändern der Tropenzone lagen, vom permischen Inlandeis betroffen worden, sondern auch dem Äquator ganz nahe gelegene wie Togo und das Kongobecken. KOERT hatte aus Togo Konglomerate beschrieben, die einen glazialen Habitus besitzen sollten. KOKEN scheint diesen zu bezweifeln und ich muß gestehen, daß ich angesichts der äquatornahen Lage von Togo auch recht starke Bedenken hatte. Herr Dr. KOERT hatte nun die Freundlichkeit, mir sein gesamtes, ziemlich umfangreiches Material zu zeigen. Das Togokonglomerat gleicht in jeder Hinsicht echtem Dwykakonglomerat so genau, daß es mir nicht möglich ist, Handstücke von beiden zu unterscheiden. Hier wie dort sind in einer graugrünen, ungeschichteten Matrix regellos und ohne Rücksicht auf ihre Größe kantengerundete Geschiebe verteilt, von

denen einzelne deutlich geschrammt sind. Wenn man das Dwyka-konglomerat für eine verhärtete Grundmoräne ansieht, so hat man auch nicht den allergeringsten Grund, an dem glazialen Ursprung des Togokonglomerates zu zweifeln.

Sein Gegenstück findet das Togokonglomerat im Kongo-becken, von dem mir vor kurzer Zeit der Direktor der kapländischen Landesuntersuchung, A. W. ROGERS, schrieb: „It seems certain, that the Dwyka extends into the Congo basin.“

Damit schwindet aber auch die letzte Möglichkeit, die permische Vereisung ohne eine sehr starke Temperaturherabsetzung erklären zu wollen.

Gegen die Annahme einer allgemeinen Temperaturerniedrigung scheint allerdings die Tatsache zu sprechen, daß wir permische Glazialschichten auf der Nordhemisphäre nördlich vom 35. Breitegrade noch nicht mit Sicherheit kennen. Unter diesen Umständen müßte ich wie FRECH und bis vor kurzem H. v. STAFF den Fund des seither verstorbenen Landesgeologen Dr. G. MÜLLER mit größter Freude begrüßen, der auf Schacht I der Zeche Preußen II in Westfalen permisches Glazialkonglomerat und unter ihm eine geschrammte Oberfläche von Obercarbon entdeckt zu haben vermeinte. FRECH's Äußerungen über diesen Fund lauten äußerst bestimmt, sehr viel positiver jedenfalls, als sich G. MÜLLER darüber ausgesprochen hat: „In Westfalen (Zeche Preußen II) ist die Oberkante des Carbon glazial geschrammt und das tiefste Rotliegende stellt eine typische Grundmoräne dar, wie G. MÜLLER nachwies¹. — Eine Verwechslung dieser echt glazialen Bildungen mit tektonischen Pseudoglazialgeschieben ist ausgeschlossen.“ Und bei der Erklärung der Photographie, die die geschrammte Carbonoberfläche darstellt, sagt er: „Nachdem neuerdings zu wiederholten Malen Zweifel an der Richtigkeit der von G. MÜLLER entdeckten Gletscherspuren im westfälischen Rotliegenden geäußert worden sind, glaube ich dem Andenken des der Wissenschaft zu früh entrissenen Forschers die Bekanntgabe dieser wichtigen Aufnahme schuldig zu sein.“

Um zu verhindern, daß FRECH's Anschauung ihren Einzug in die Lehrbücher hält, muß ich mich ebenso klar und deutlich

¹ Dies. Jahrb. 1908. II. 77.

ausdrücken wie er und erkläre daher auf das bestimmteste, daß ich von einer glazialen Bearbeitung an den Stücken der Grube Preußen II, bis auf ein noch etwas zweifelhaftes Geröll, auch nicht das geringste zu erkennen vermag. Die „geschrammte Oberfläche der Steinkohlenformation“ kann ich lediglich als eine Art von Spiegel ansehen. Es macht den Eindruck, als ob das Carbon hier feucht und ziemlich weich gewesen wäre, deswegen hinterließen wohl die permischen Gerölle eine so deutliche Spur, wie sie auf der rechten Seite des Stückes ausgeprägt ist. Die Schrammen, welche die größtenteils glatte Spiegelfläche in der Mitte des Stückes durchsetzen, sind augenscheinlich jünger als die polierte Fläche und die eben besprochene Hohlkehle.

Das rotliegende Konglomerat im Hangenden des Obercarbon hat auch nicht die geringste Ähnlichkeit mit Dwyka- oder einem anderen echt glazialen Konglomerat, unterscheidet sich hingegen von vielen typischen Rotliegendkonglomeraten nicht. Seine Gerölle sind gerundete und abgeflachte Flußgerölle; einzelne von ihnen besitzen allerdings Schrammen, die sich aber doch von Glazialschrammen unterscheiden lassen. Von diesen Geröllen unterscheidet sich allerdings das von FRECH auf Textfigur 1 (l. c. p. 76) dargestellte durch seine kantengerundeten Umrisse und die Art der Schrammung. Dieses Geröll fand sich bei einer neuerdings vorgenommenen Durchsicht nicht mehr unter den von der geologischen Landesanstalt aufbewahrten Stückchen vor, und ich kann mich nicht erinnern, es im Winter 1903/4 gesehen zu haben, als mir G. MÜLLER die übrigen Stücke zeigte. Ich hielt es daher für möglich, daß bei diesem Stücke, bzw. seiner Photographie, eine Verwechslung vorliegt. Nach einer freundlichen Mitteilung von FRECH soll dies jedoch ausgeschlossen sein. Zu dem, was sich aus den Stückchen direkt ableiten läßt, kommt noch ein anderes, wichtiges Moment. Alle echten permischen Glazialbildungen sind über weite Strecken verbreitet, das sogen. „Glazial“ in Westfalen ist aber auf den Schacht der Grube Preußen II beschränkt geblieben. In keinem anderen Aufschlusse des westfälischen Kohlengebirges ist je etwas Ähnliches gefunden worden, wie mir einer der besten Kenner der einschlägigen Verhältnisse, Herr Professor KRUSCH, mitteilt. Es handelt sich also um eine ganz lokale Erscheinung und um ein hübsches und lehrreiches Stück Pseudoglazial, sicher aber nicht um eine echte permische Glazialbildung.

Trotzdem müssen jungpaläozoische Glazialbildungen auch in den höheren Breiten der Nordhemisphäre vorhanden gewesen sein, wenn wir, wie oben weiter ausgeführt, eine allgemeine Temperaturherabsetzung anzunehmen haben. Es ist aber sehr wohl denkbar, daß sie ursprünglich vorhanden, aber bereits sehr frühzeitig zerstört worden sind. Die meisten terrestren Sedimente sind nicht ununterbrochen abgelagert worden, zwischen die Zeiten der Ablagerung schalten sich vielfach lange Perioden der Zerstörung ein. Auch dort, wo die rotliegenden Ablagerungen anscheinend vollständig vertreten sind, wie im Thüringer Walde, verraten Diskordanzen bedeutende Abtragungen. Es ist daher durchaus denkbar, daß auch in unseren Breiten rotliegende Glazialbildungen ursprünglich vorhanden waren, sehr bald aber wieder zerstört wurden. Dies mußte sogar der Fall sein, wenn die Glazialsedimente höher gelegene Teile der Festländer bedeckten, die später keine Senkung erfuhren, oder wenn die Gebiete der jungpaläozoischen Vereisung gehoben wurden. Wenn das alpine Gebiet nicht nachträglich gesenkt wird, so werden sich von seinen ausgedehnten quartären und rezenten Glazialablagerungen im besten Falle geringe Reste am Südrande der Alpen erhalten. Wenn aber permisches Glazial in so großer Verbreitung besonders in niederen Breiten bekannt ist, so hat dies seinen Grund darin, daß es hier durch tiefe und lang andauernde Senkungen vor frühzeitiger Zerstörung geschützt wurde.

8. Das gleichmäßige Klima der Vorwelt und die Ausbildung von Klimazonen.

FRECH nimmt für das ältere Paläozoicum vom Cambrium bis zum Untercarbon einschließlich und für die untere Hälfte des Mesozoicums gleichmäßige, tropische bis subtropische Temperaturen auf der gesamten Erdoberfläche an. Erst vom Obercarbon bzw. vom oberen Jura ab bilden sich nach ihm allmählich Klimazonen aus. Gegen diese Anschauung habe ich schon früher Stellung genommen, da aber FRECH auch in seiner neuesten Arbeit von einer Ausbildung von Klimazonen in der oberen Kreide spricht, so sehe ich mich genötigt, noch einmal etwas ausführlicher auf meine frühere Darstellung zurückzugreifen.

Eine sehr einfache Überlegung zeigt, daß Klimazonen und die mit ihnen verbundenen Strömungen

der Luft und des Meeres stets vorhanden gewesen sein müssen. Immer trafen die Sonnenstrahlen das Tropengebiet unter steilem, die Polarregionen unter flachem Winkel; deswegen war stets das Quantum von Wärme, das ein Quadratmeter Land von der Sonne erhielt, abhängig von der geographischen Breite.

Dieser selbstverständliche Schluß¹ ist natürlich schon früher gezogen worden, so von NEUMAYR, der betonte, „daß die Hypothese einer gleichmäßig warmen Temperatur auf der ganzen Erde mit alledem, was daran hängt, durchaus unberechtigt ist.“ Mit großer Schärfe stellt NEUMAYR die allein zu beantwortende Frage: „Daß klimatische Unterschiede bestanden haben, kann nach dem, was in früheren Abschnitten, namentlich bezüglich der Kohlenformation gesagt wurde, nicht bezweifelt werden, und es kann sich nur darum handeln, die Ursachen zu finden, warum wir die Spuren davon bei den vorjurassischen Marinfraunen nicht mit Bestimmtheit nachweisen können.“

Man kann also nicht von einer Ausbildung von Klimazonen reden, die in einer gewissen Periode eingesetzt haben soll, sondern nur von einer schärferen Herausprägung und Verstärkung bereits vorhandener Temperaturunterschiede. Eine solche mußte aber eintreten, wenn die Temperaturen an der gesamten Oberfläche sich senkten, besonders aber zu der Zeit, in der in höheren Breiten erhebliche Massen von Schnee fielen. Durch die stärkere Reflexion der Schneedecke werden die Wintertemperaturen tief herabgedrückt, im Frühjahr aber wird ein großer Teil der Sonnenwärme, der in schneefreien Gebieten der Erwärmung des Landes zugute kommt, zum Auftauen von Schnee und Eis verwendet.

Andererseits verringern sich zweifellos die klimatischen Unterschiede, wenn die Temperaturen an der Erdoberfläche steigen. Luft- und Meeresströmungen werden verstärkt, weil der Temperaturgradient steiler wird; der Temperatenausgleich zwischen niederen und hohen Breiten wird also ergebiger. Die Menge des Wasserdampfes wächst bei höheren Temperaturen, dadurch ist die Atmosphäre imstande, mehr Wärme zu absorbieren; die „Glashauswirkung“ des Wasserdampfes erhöht sich dementsprechend.

¹ Vergl. auch F. v. KERNER, Bemerkung zu C. BURCKHARDT: Sur le climat de l'époque jurassique. Verh. k. k. geol. Reichsanst. 1907. p. 382.

Das alles führt ein gleichmäßigeres, aber noch nicht ein ganz gleichmäßiges Klima an der Erdoberfläche herbei.

Fragen wir nun, ob es irgendwelche vorweltlichen Erscheinungen gibt, die sich nur mit der Annahme eines völlig ausgeglichenen Klimas erklären lassen.

Die Beurteilung paläoklimatischer Verhältnisse stützt sich auf geologische und paläontologische Faktoren. Die letzteren sind desto beweiskräftiger, je jünger, d. h. der heutigen ähnlicher eine vorweltliche Fauna oder Flora ist. Bei der Verwertung geologischer Faktoren spielt das Alter keine Rolle, falls das betreffende Gestein keine wesentlichen nachträglichen Veränderungen erlitten hat. Wir können eine Vereisung mit gleicher Sicherheit an dem uralten permischen Geschiebemergel wie an einer quartären Grundmoräne nachweisen.

Nun wissen wir, daß der Charakter der heutigen Sedimente, besonders der terrestren, in hohem Grade von den klimatischen Bedingungen abhängig ist. Ein Vergleich fossiler und heutiger Ablagerungen kann also auch einiges über paläoklimatische Fragen aussagen. Im allgemeinen hat man aber von diesem Argument nur bei den Eiszeiten Gebrauch gemacht. Sonst findet man diese Betrachtungsweise selten. In jüngster Zeit ist aber die petrographische Beschaffenheit von Sedimentgesteinen benützt worden, um durch sie ein exzessiv heißes und trockenes Klima im Inneren der großen mesozoischen Kontinentalmassen zu beweisen. Die vorweltlichen Klimazonen suchte man jedoch bisher im wesentlichen aus der Verbreitung bestimmter Tiergruppen abzuleiten.

Hier stehen wir jedoch auf höchst unsicherem Boden. Fast in allen Fällen haben wir es mit ausgestorbenen Formen zu tun, deren Empfindlichkeit gegen Temperaturunterschiede uns gänzlich unbekannt ist. Herrschen aber in einer fossilen Fauna sthenotherme Gattungen und Arten vor, so werden sich die stets vorhandenen Klimazonen deutlicher ausprägen; dies scheint z. B. in der oberen Kreide der Fall zu sein, in der die wahrscheinlich an sehr warmes Wasser gebundenen Rudisten in niederen Breiten einen Ring um die Erde bilden. Setzt sich hingegen die Organismenwelt einer Periode vorwiegend aus eurythermen Typen zusammen und sind die Temperaturen an der Erdoberfläche überhaupt hoch, so werden die Klimazonen anscheinend verschwinden, wiewohl sie,

wenn auch im Vergleich mit heutigen Verhältnissen abgeschwächt, stets vorhanden gewesen sein müssen.

Wie leicht paläontologische Objekte täuschen können, zeigt die Juraflora¹. Hält man sich nur an die Pflanzenabdrücke, so ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede, mögen die Fundorte auch durch Dutzende von Breitengraden voneinander getrennt sein. Der Schluß auf ein völlig ausgeglichenes Klima liegt also sehr nahe. Untersucht man aber auch die versteinerten Hölzer, so bemerkt man, daß sie sämtlich in unseren Breiten Jahresringe besitzen. Das deutet aber auf ziemlich starke jahreszeitliche Unterschiede hin, wie sie dem Tropenklima, wenigstens in der Nähe der See, fehlen. Feuchtwarmes, auf der ganzen Erde gleichmäßiges Klima und Jahresringe widersprechen sich also, und letztere deuten nicht nur auf stark ausgeprägte Jahreszeiten, sondern auch auf Klimazonen hin.

9. Über die sogen. Einheitlichkeit der quartären Eiszeit.

Bis vor kurzer Zeit hat man allgemein die Anschauung vertreten, daß die diluviale Eiszeit keine zusammenhängende Kälteperiode war, sondern von einer Anzahl von Interglazialzeiten unterbrochen wurde, in denen das Klima dem heutigen ähnlich und die Vereisung auch etwa auf ihren jetzigen Umfang reduziert war. Über die Zahl der Interglazialzeiten schwankten allerdings die Angaben aus den verschiedenen Vereisungsgebieten und bei den einzelnen Beobachtern.

Neuerdings ist jedoch GEINITZ² mit der Anschauung hervorgetreten, die diluviale Eiszeit sei einheitlich gewesen; die sogen. Interglazialzeiten sind daher nach ihm kurze und wenig bedeutende Klimaschwankungen, die nur ein geringes Zurückweichen des Eisrandes in den vergletscherten Gebieten zur Folge hatten. GEINITZ hat eine Anzahl von Anhängern gefunden, zu denen in Deutschland in erster Linie auch FRECH gehört; im allgemeinen hält man jedoch, besonders in den Alpen und in Nordamerika, an dem älteren Begriffe der Interglazialzeiten fest.

¹ Vergl. GOTHAN, Über die Frage der Klimazonenbildung im Jura und in der Kreide. Naturw. Wochenschr. N. F. 7. 1908. p. 219.

² Besonders in Lethaea geognostica. 3. 2, Quartär und die Einheitlichkeit der quartären Eiszeit. Dies. Jahrb. Beil.-Bd. XVI. 1902. 1.

Allerdings muß man darüber klar sein, daß die diluviale Vereisung sehr viel leichter zu erklären wäre, wenn man sie im wesentlichen als einheitlich ansieht. Besonders die Erklärungsversuche auf morphologischer Basis, denen GEINITZ und auch KOKEN zuzurechnen (elevation hypothesis bei CHAMBERLIN und SALISBURY), scheinen größere Interglazialzeiten ausschließen zu müssen. Im anderen Falle hätte man anzunehmen, daß die Festlandsmassen im Quartär wie ein Gummiball auf- und niedersprangen.

Auch die Erklärung der diluvialen Eiszeit mit Hilfe der Kohlen säurehypothese wird erheblich einfacher, wenn man nur eine einmalige Klimaschwankung annimmt. Unbedingt wird man aber zu dieser Auffassung gezwungen, wenn man mit FRECH ein Stocken der vulkanischen Tätigkeit während des gesamten Diluviums als Ursache der Eiszeit ansieht.

Ich darf wohl von einer erneuten Diskussion der norddeutschen Interglazialprofile absehen, wie sie neuerdings E. GEINITZ vorgenommen hat. Mancherlei wird hier noch auf Jahre hinaus kontrovers bleiben. Aber selbst wo zweifellos eine Organismenwelt, deren Existenz ein dem heutigen Klima verwandtes verlangt, von echten Glazialbildungen über- und unterlagert wird, werden die Ansichten über die Lage des Eisrandes sich noch weit voneinander entfernen. Die Anhänger einer einheitlichen Vereisung werden annehmen, daß diese Organismen in der unmittelbaren Nachbarschaft des Inlandeises ihre Existenzbedingungen finden konnten. Die Gegner dieser Theorie werden aus einer Lebewelt, die sich von der heutigen am gleichen Orte nicht wesentlich unterscheidet, auf einen Umfang der Vereisung schließen, der ebenfalls dem heutigen entspricht. Es heißt hier also nicht das einzelne Interglazialprofil, sondern die klimatischen Grundanschauungen der beiden Theorien diskutieren.

GEINITZ spricht seine Anschauung am klarsten in den folgenden Worten¹ aus: „So schob sich das Eis vor in Gegenden mit heutigem Klima, zum Teil noch in grüne Gefilde, ähnlich wie jetzt in die Alpentäler, wie nach den Beobachtungen STEINMANN's in Patagonien usw.“

Daß die Zungen von Talglutschern oft bis in die Waldregion hineinreichen und keineswegs von ihr durch einen breiten

¹ E. GEINITZ, Wesen und Ursache der Eiszeit. Güstrow 1905. p. 22.

Gürtel von Wüsten- oder Tundrencharakter getrennt sind, ist ja allgemein bekannt. Unrichtig ist es aber, diese Beobachtungen ohne weiteres auf die Verhältnisse am Rande eines ausgedehnten Inlandeises zu übertragen.

Wenn Talgletscher von alpinem Charakter oft so tief in Gebiete mit ziemlich hohen Jahresmitteln hinabreichen, so erklärt sich das aus den außergewöhnlich günstigen Lebensbedingungen, unter denen diese lokalen Eisströme stehen. Die Firnmulden sammeln nicht nur den Schnee, der in ihre Tiefe fällt, sondern auch die Schneemassen, die ihre Abhänge treffen; so ist denn schon die Ernährung eines jeden Talgletschers eine abnorm kräftige. Aus dem Firngebiet werden die Massen wegen des meist bedeutenden Gefälles ziemlich rasch zu Tal geführt. In der Gletscherzunge wird aber die Ablation durch verschiedene Momente verzögert. Der Grund des meist engen Tales wird nur zu bestimmten Tageszeiten von den Sonnenstrahlen getroffen, auch abtragende Winde haben nur beschränkten Zutritt. Der Gesteinsschutt aber, welcher in großen Massen von den Abhängen herabstürzt, breitet über die Gletscherzunge einen schützenden und nach abwärts sich immer mehr verdickenden Mantel.

Alle diese günstigen Momente fallen für das Inlandeis fort. Seine Ernährungsbedingungen sind normal, nicht außergewöhnlich günstig wie beim Talgletscher. Seine Oberfläche aber wird von den ersten wie den letzten Strahlen der Sonne getroffen und erbarmungslos von allen Winden gefegt, dazu kommt, daß ein Schuttmantel ganz fehlt oder doch zum mindesten nur sehr lückenhaft sein kann. So steht denn das Inlandeis unter anderen, sehr viel ungünstigeren Lebensbedingungen als ein Talgletscher und wird sich daher nie so weit in eine ihm feindliche Klimazone vorwagen dürfen wie dieser. Ein Talgletscher kann noch tief in die Waldregion hinabreichen, während das Inlandeis schon weit vorher sein Ende finden wird.

Man könnte hier einwenden, daß ein vorrückendes Inlandeis schließlich doch einmal die Waldzone erreicht haben würde. Dies mußte ja sicher eintreten, wenn der Wald seine Ausdehnung auch bei zunehmender Vergletscherung nicht veränderte. Allein es ist sehr wahrscheinlich, daß der Wald dem Inlandeise nicht standhielt, sondern vor ihm floh und daß den Eisrand stets eine breite waldlose Zone umgab. Um das zu verstehen, müssen wir den Ein-

fluß ausgedehnter Eismassen auf das Klima ihrer Umgebung ins Auge fassen.

Man darf annehmen, daß die klimatischen Effekte alpiner Talgletscher ziemlich geringfügig sind. Die Abkühlung, welche von ihnen ausgeht, ist wenig bedeutend und nicht imstande, die Schneegrenze in ihrer Nachbarschaft wesentlich herabzudrücken. Auch sind diese lokalen Eisströme nicht fähig, die Windsysteme erheblich zu beeinflussen.

Ganz anders liegen die Dinge beim Inlandeis. Seine ungeheuren Eismassen müssen die Umgebung bis in ziemlich große Entfernung abkühlen, speziell aber kalte Sommer hervorrufen, wie wir solche im antarktischen Gebiete beobachten können. Ganz besonders müssen aber die Windverhältnisse unter der Einwirkung des Inlandeises stehen. Über seinen riesigen Flächen wird stets kalte und schwere Luft lagern, hier müssen wir also ein konstantes Hochdruckgebiet annehmen. Ein solches ist bereits im Inneren des verhältnismäßig schmalen grönländischen Inlandeises vorhanden und muß in der Antarktis eine riesenhafte Ausdehnung besitzen. Von ihm wird in das unvereiste Gebiet kalte und schwere Luft abfließen, mit besonderer Heftigkeit dann, wenn im Vorlande Niederdruck herrscht. Die Regionen am Rande des Inlandeises werden also von Stürmen getroffen werden, welche in manchen Jahreszeiten besonders häufig und heftig auftreten. Die vom Pol gegen den Äquator zu abfließenden Luftströme müssen aber infolge der Erdrotation östliche Richtungen annehmen.

Diese Stürme haben im allgemeinen Föhncharakter. Da aber die Temperaturen an ihrem Ausgangspunkte außerordentlich niedrig sein dürften, so werden Luftströme, wenn sie das Eisvorland erreichen, zwar sehr trocken, aber immer noch sehr kühl sein.

Es liegt auf der Hand, daß diesen äußerst heftigen, kalten und trockenen Stürmen am Inlandeisrande der Wald unmöglich Widerstand leisten kann. An geschützten Orten wird sich wohl eine genügsame und dem rauhesten Klima angepaßte Tundravegetation ansiedeln, im allgemeinen wird aber hier die Wüste vorherrschen. (Schon auf Kerguelen, wo die Winde zwar äußerst heftig, aber noch nicht sehr kalt und trocken sind, beobachtet man ähnliche Verhältnisse.) Alles feinere und feinste Material, soweit es nicht durch Wasserbedeckung gegen den Wind geschützt ist, wird aus dieser Zone herausgeführt werden müssen. Die Sande

werden zu ausgedehnten Dünenzügen¹ angehäuft, von dem fliegenden Sande aber werden die freigelegten Geschiebe zu Dreikantern abgeschliffen werden.

In größerer Entfernung vom Inlandeisrande erst werden auch die feinsandigen und staubförmigen Bestandteile zum Absatz gelangen können. Hier wird schon eine geschlossene Vegetationsdecke möglich sein, aber sie wird sich aus Gräsern, Kräutern und kleinen Stauden zusammensetzen. Es sind dies die extraglazialen Steppengebiete, in denen der Löß sich sammelt. Erst jenseits der breiten Steppenzone, vom Inlandeisrande getrennt durch eine Strecke von wahrscheinlich mehreren hundert Kilometern, wird Wald sich ansiedeln können.

Solche Klima- und Sedimentationszonen am Außenrande des Inlandeises kennen wir allerdings einigermaßen vollständig erst aus der letzten Phase der jüngsten Vereisung. Es liegt aber auch nicht der geringste Grund vor, anzunehmen, daß in früheren Stadien der Vereisung, sobald das Inlandeis einmal erhebliche Ausdehnung erreicht hatte, die Dinge anders gelegen hätten. Nur muß man im Auge behalten, daß ein vorrückendes Inlandeis natürlich sehr bald die äußerst beweglichen äolischen Sedimente der Wüsten- und Steppenzone vernichten müßte. Ein im Rückzuge befindliches Inlandeis aber hinterließ nur dann deutliche Spuren der klimatischen Zonengliederung, wenn das Zurückweichen sehr langsam war oder wenn der Eisrand längere Zeit stationär blieb.

So gelangen wir denn dazu, den Satz GEINITZ': „So schob sich das Eis vor in Gegenden mit heutigem Klima“, für das nordische Inlandeis, sobald es eine gewisse Ausdehnung erreicht hatte, unbedingt zu verwerfen. Wenn nun aber in den Quartärablagerungen Norddeutschlands Tier- und Pflanzenreste auftreten, die auf das heutige Klima hindeuten, so müssen wir annehmen, daß der Rand des Eises in weiter Entfernung lag. Es liegt doch entschieden der Gedanke am nächsten, daß einem heutigen Klima in Norddeutschland, wie es durch manche quartäre Fossilfunde angezeigt wird, auch die heutige Vergletscherung entsprach. Dann aber haben wir es im Quartär nicht mit kurzen und unbedeutenden

¹ Vergl. besonders SOLGER, Interessante Dünenformen in der Mark Brandenburg. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 57. 1905. p. 179, und die dort zitierten Arbeiten von VAHL und HAMMER.

Klimaschwankungen, sondern mit langen Interglazialperioden zu tun, wie dies bisher angenommen wurde.

Noch klarer als in Norddeutschland wird aber das Vorhandensein von Interglazialzeiten meines Erachtens in den Alpen bewiesen. Die interglazialen Fundstellen liegen nicht nur in den peripheren Teilen der vereisten Gebiete, sondern in einzelnen Fällen auch nahe an den Zentren der Vereisung (Höttinger Breccie etc.). Ihr Fossilinhalt deutet aber vielfach sogar noch auf ein wärmeres Klima hin, als es heute an den gleichen Lokalitäten herrscht.

Ebenso ist die intensive Verwitterung vieler altquartären Glazialgebilde, z. B. des italienischen Ferretto, nur dann zu erklären, wenn man lange Zeiten mit feuchtem und warmem Klima annimmt, in denen diese Glazialablagerungen nicht vom Eise bedeckt waren.

Auf einem etwas anderen Wege als GEINITZ sucht FRECH neuerdings die Einheitlichkeit der quartären Eiszeit wahrscheinlich zu machen; er sieht nämlich als Hauptargument die geographische Verbreitung der quartären Säugetiere an. Sein Gedankengang geht aus den beiden folgenden Sätzen¹ klar hervor: „Wenn sich nachweisen läßt, daß die aus Sibirien stammenden Mammuts und wollhaarigen Nashörner nicht nach Finnland und Skandinavien vordrangen, wenn die beiden beweglichen und widerstandsfähigen Tiere auch in Italien und Spanien fehlen, so würde sich hieraus der Schluß ergeben, daß die Fennoskandia wie die Alpen und Pyrenäen von einem einheitlichen, während der Quartärperiode nicht verschwindenden Eismantel bedeckt waren. Dann läßt sich weiter mit Sicherheit behaupten, daß nur das Vorland der Alpen einerseits, das Baltische Becken und der nördlichste Teil Deutschlands andererseits der Schauplatz von ausgedehnten Oszillationen des Eisrandes waren, daß aber die Vereisung der Zentren einen einheitlichen Charakter getragen hat.“

Nach der Angabe von FRECH erlöschten vor Beginn der eigentlichen Eiszeit die wenigen noch übrig gebliebenen Vertreter eines warmen Klimas, deren Fell nicht durch ein dickes Haarkleid geschützt wurde. Das gilt zweifellos für einige Tierarten, sicher

¹ Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. 1906. p. 543.

aber nicht für *Rhinoceros Mercki* und *Elephas antiquus*, die FRECH ausdrücklich nennt. Beide Formen gehören zu den häufigsten der Taubacher Travertine, man wird diese aber nach den neueren Untersuchungen wohl nirgends mehr für präglazial halten. Auch in Rixdorf kommt, wenngleich selten, *Rhinoceros Mercki* vor. Zweifellos lebt ein Teil der „Präglazialfauna“ auch nach dem Beginn der Vereisung in Mitteleuropa noch weiter und scheint sogar mit der „Glazialfauna“ gemeinsam vorzukommen.

Diese eigentliche „Glazialfauna“, deren Hauptvertreter *Elephas primigenius* und *Rhinoceros antiquitatis* sind, drang, wie wohl niemand bestreiten wird, von Nordosten her nach Mittel- und Westeuropa vor. Hier tummelte sie sich nach FRECH in dem verhältnismäßig engen Raume zwischen dem nordischen Inlandeise und den Alpen und Pyrenäen. An der Überschreitung dieser Hochgebirge wurde sie, wie FRECH meint, durch deren starke Vergletscherung verhindert.

Diese Annahme erscheint jedoch nicht ganz einwandfrei. Hochgebirge werden stets, ob vergletschert oder nicht, der Verbreitung jeder Tiergruppe ein sehr bedeutendes, in vielen Fällen unüberschreitbares Hindernis in den Weg legen. Für eine einem rauhen Klima angepaßte Tierwelt würden aber Gletscher, welche die steilwandigen Täler der Alpen teilweise ausfüllten, das Hochgebirge eher gangbarer als unwegsamer gemacht haben. Es ist daher sehr wohl denkbar, daß die Glazialfauna Mitteleuropas wohl imstande war, die Hochgebirge in ihrem Süden zu überschreiten, daß sie aber die südeuropäischen Halbinseln deswegen nicht besiedelte, weil ihr deren verhältnismäßig mildes Klima nicht zusagte.

„Wie auf der südeuropäischen Halbinsel fehlt auch in Skandinavien das Mammut und das Wollhaarnashorn gänzlich, während aus Finnland nur seltene Reste postglazialen Alters vorliegen. Auch in Estland und Livland wurden nur ganz vereinzelt Funde der beiden eiszeitlichen Riesen gemacht, und erst in Kurland wird das Mammut häufiger. Während also der Eiswall der Pyrenäen und Alpen die ganze Kälteperiode überdauerte, blieben Skandinavien und Finnland ebenfalls unter einem niemals abschmelzenden Inlandeis begraben. Das Fehlen der kälteliebenden Mammute und Nashörner im Norden von Europa ist der beste Beweis gegen die Annahme von Interglazialzeiten.“ Auf den ersten Blick scheinen diese Sätze von FRECH überzeugend zu wirken, denkt man aber

etwas über sie nach, so verlieren sie mehr und mehr ihre Beweiskraft.

Zunächst wird man die Frage einwerfen müssen, ob man überhaupt auf dem Boden von Fennoskandia interglaziale Mammut- und Nashornreste erwarten darf. Finnland und Skandinavien gehörten während der quartären Eiszeit zum Abtragungsgebiete. Aus ihnen wurde nicht nur alles lockere Material, sondern auch eine große Masse von anstehendem Fels herausgetragen, um in den peripheren Teilen des Vereisungsgebietes, z. B. in der norddeutschen Tiefebene erst wieder zum Absatz zu gelangen. Wenn sich also in irgendeiner eisfreien Periode auf dem Boden von Fennoskandia Interglazialsedimente bildeten, so wurden sie höchst wahrscheinlich von der darauf folgenden Vereisung wieder abgetragen.

Mit dieser Annahme scheinen die Tatsachen im Einklang zu stehen. Nach der Ansicht von GEINITZ sind die Beweise für eine Interglazialzeit in Schweden recht spärlich¹. Neuerdings hat HOLST dieselben energisch angefochten und kommt zu dem Schlusse, daß in Schweden nicht mehr als eine Eiszeit nachweisbar ist; „irgendein Beweis für zwei Vereisungen ist bis auf den heutigen Tag nicht erbracht worden.“

Ich kann aber aus dem Vorhandensein nur einer Vereisung nicht zu dem Schlusse gelangen, den HOLST und GEINITZ ziehen, sondern ich folgere, daß ältere Vereisungen und Interglazialzeiten zwar in Fennoskandia vorhanden gewesen sein können, daß ihre Spuren aber durch die letzte Vereisung wahrscheinlich vernichtet worden sind. Wir können daher heute nicht mehr feststellen, ob die Glazialfauna Mitteleuropas in irgendeiner wärmeren Periode des Quartärs die Länder nördlich von der Ostsee besucht hat oder nicht.

Es ist übrigens durchaus denkbar, daß in Interglazialzeiten die Eisfauna Fennoskandia nicht oder nur teilweise besiedelte, wiewohl hier ebensoviel Land eisfrei war wie heute. Denn auch in der Postglazialzeit drangen Mammut und wollhaariges Rhinoceros nicht oder wenigstens nicht weit nach Fennoskandia vor. Was sie daran hinderte, ist nicht leicht zu sagen. Ob die lange Dauer der Eiszeit, wie FRECH meint, die nordischen Riesen so

¹ *Lethaea geognostica*. III. T. 2. Quartär. p. 105.

sehr geschwächt hatte, daß ihnen weite Wanderungen unmöglich wurden, ob in den eisfrei gewordenen Gebieten Nordeuropas die Futterpflanzen noch zu spärlich wuchsen, oder ob sonst irgendein Grund vorlag, läßt sich wohl noch nicht entscheiden. Auf jeden Fall aber konnte wohl die gleiche Ursache, die das Vordringen von Mammut und Rhinoceros in der Postglazialzeit verhinderte, auch in irgendeiner Interglazialperiode diesen Tieren verwehrt haben, dem schwindenden Inlandeise nach Norden zu folgen.

Fassen wir noch einmal das hier Gesagte zusammen. Wenn die Glazialfauna die europäischen Hochgebirge nicht überschritt, so braucht nicht deren andauernde Eisbedeckung die Ursache gewesen zu sein. Die Gebirge allein, ebenso wie das Klima Südeuropas konnten die nordische Tierwelt fernhalten. Daß die Glazialfauna während der gesamten Eiszeit nicht auf dem Boden von Fennoskandia gelebt hat, läßt sich nicht mehr nachweisen. Aus der Verbreitung der nordischen Quartärfauna einen sicheren Schluß auf eine einheitliche Vereisung der europäischen Hochgebirge und Nordeuropas zu ziehen, geht nicht an.

10. Die Analogien zwischen Permo-Carbon und Quartär-Tertiär.

Schon seit langer Zeit hat man auf die Analogien zwischen Permo-Carbon und Quartär-Tertiär hingewiesen. In beiden Perioden beobachtet man eine äußerst lebhaft gebirgsaufrichtung und eine starke Wiederbelebung der vulkanischen Kräfte. Hier wie dort tritt eine Temperaturerniedrigung ein, die schließlich zu einer Vereisung ausgedehnter Landmassen führt. Schließlich aber häufen sich in der älteren wie in der jüngeren Periode Pflanzenreste in größtem Maßstabe zu Kohlenflözen an.

Es fragt sich nun, ob diese vier Phänomene in irgendeinem Zusammenhange miteinander stehen oder ob ihr Zusammentreffen ein rein zufälliges ist.

a) Vulkanismus und Tektonik.

Man hat sich in wissenschaftlichen Kreisen daran gewöhnt, Erdbeben und Vulkantätigkeit scharf auseinanderzuhalten und einen direkten Zusammenhang zwischen beiden Phänomenen in den meisten Fällen als unwahrscheinlich, zum mindesten als unbeweisbar darzustellen. Begründet wird diese Auffassung durch die häufig wiederholte Beobachtung, daß in Gegenden, in denen Vulkanausbrüche und Erdbeben nicht selten sind, beide Erscheinungen zeitlich meist nicht zusammenfallen. Wenn aber wirklich ein großer Vulkanausbruch und ein Erdbeben fast gleichzeitig eintreten, wie dies z. B. im April 1906 am Vesuv und in S. Francisco der Fall war, so ist häufig der Abstand der betroffenen Regionen voneinander so groß, daß man an eine direkte Beeinflussung nicht zu denken vermag und eher ein zufälliges Zusammenreffen annimmt.

Zu dem ersten Punkte muß bemerkt werden, daß Gleichzeitigkeit bei beiden Phänomenen nur selten erwartet werden kann. Auch wenn vielleicht beide Ereignisse durch eine gemeinsame Veranlassung ausgelöst sein sollten, so schlägt doch die Fortentwicklung an beiden Stellen wahrscheinlich ein sehr verschiedenes Tempo ein; es ist daher wohl anzunehmen, daß die Höhepunkte der beiden, vielleicht schon sehr frühzeitig beginnenden Prozesse zeitlich weit auseinanderliegen können.

Will man einen schlechten und in mancher Hinsicht hinkenden Vergleich gebrauchen, so kann man an zwei nebeneinanderliegende Geiser von ungleichen Dimensionen erinnern. Die Erhitzung erfolgt bei beiden gleichmäßig, aber die Paroxysmen treten in sehr verschiedenen Perioden ein.

Am stärksten scheint gegen einen Zusammenhang seismischer und vulkanischer Phänomene die Beobachtung zu sprechen, daß zwar in manchen Regionen beide Ereignisse miteinander auftreten, daß aber andere sehr ausgedehnte Gebiete zwar stark von Erdbeben heimgesucht werden, aber frei von Vulkanausbrüchen sind. Dabei vergißt man aber einen äußerst wichtigen Punkt: daß wir an der heutigen Erdoberfläche nur die effusive Tätigkeit des Vulkanismus wahrnehmen, daß aber alle Intrusionsvorgänge, die sich heute abspielen können, sich unserer Beobachtung entziehen. Wir können absolut nicht wissen, ob nicht gerade in den Erdbeben-

bezirken, die anscheinend frei von vulkanischen Erscheinungen sind, Intrusionen von Tiefengesteinen stattfinden. Dies ist sogar ziemlich wahrscheinlich, denn die Erdbeben treten meist in Regionen auf, die in neuerer Zeit starke Dislokationen erlitten haben; wir wissen aber aus älteren Erdperioden, daß Gebirgsbildung und Intrusionen häufig Hand in Hand miteinander gehen.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich die merkwürdige Tatsache, daß wir den Zusammenhang zwischen Krustenbewegungen und vulkanischen Ereignissen niemals ganz klar an den heutigen Phänomenen erkennen werden, sondern daß wir hier die wichtigsten Aufschlüsse aus dem Studium weit zurückliegender Vorgänge erhalten.

Wenn wir nun aber z. B. die Ereignisse während der Permo-Carbonzeit ins Auge fassen, so wird ein zum mindesten zeitlicher Zusammenhang zwischen Krustenbewegungen und Vulkantätigkeit klar erkennbar. Auch hier handelt es sich übrigens nicht um völlige Gleichzeitigkeit; es scheint, als ob die vulkanischen Phänomene den tektonischen nachgefolgt wären und als ob die Eruptionen ihren Höhepunkt erst dann erreichten, als die Gebirgsbildung bereits erlahmt war. Trotz dieser nicht völligen Gleichzeitigkeit hat man stets, und wohl mit Recht, auf den zeitlichen Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen hingewiesen, und es liegt sehr nahe, auch kausale Beziehungen zu vermuten. Hier scheinen dreierlei Möglichkeiten gegeben zu sein: 1. der gleiche Vorgang im Erdinneren hatte Erscheinungen auf tektonischem wie auf vulkanischem Gebiete zur Folge; 2. durch Krustenbewegungen tektonischer Art wurde vulkanische Tätigkeit hervorgerufen; 3. vulkanische Eruptionen oder Intrusionen hatten Verschiebungen der Erdkruste zur Folge.

Zu der ersten dieser drei Möglichkeiten läßt sich folgendes bemerken. Wir dürfen von der allgemein verbreiteten und wohl auch richtigen Anschauung ausgehen, daß der Sitz der Erdbeben und überhaupt aller Krustenbewegungen innerhalb der Lithosphäre, und zwar in nicht sehr großer Tiefe unter der Erdoberfläche zu suchen ist. Nennen wir diese Zone, welche auf die Abkühlungsvorgänge, ungleichmäßige Belastung etc. durch Entwicklung von Druck- oder Zugkräften am stärksten reagiert, der Kürze wegen die „aktive Zone“. Diese aktive Zone wird am leichtesten ihre Tätigkeit nach der Seite geringsten Widerstandes, d. h. gegen die Erd-

oberfläche hin, entfalten können. Es müssen aber auch gleichzeitig die in der aktiven Zone entwickelten Kräfte nach der Seite stärksten Widerstandes, d. h. nach dem Erdkern zu, sich geltend machen. Diese Druckkräfte werden sich aber teilweise in Wärme umsetzen müssen; es werden also die Gesteine unterhalb der aktiven Zone eine Temperaturerhöhung erfahren und sich ausdehnen. Es wird hier auch zu einer teilweisen Verflüssigung von bereits erstarrter Gesteinsmasse kommen können, vorausgesetzt, daß die Temperatursteigerung die ebenfalls durch den Druck herbeigeführte Erhöhung des Schmelzpunktes übersteigt. (Es wird hier angenommen, daß diese Vorgänge sich noch diesseits, d. h. außerhalb der von TAMMANN konstruierten Zone des maximalen Schmelzpunktes abspielen.)

Durch den Druck der aktiven Zone und der bei der Verflüssigung auftretenden Volumenvergrößerung wird die Tendenz entstehen, Teile des Erdinneren durch die aktive Zone hindurch nach oben zu pressen. Sie werden natürlich dort in erster Linie ihren Ausweg finden, wo durch mechanische Umwälzungen an der Erdoberfläche auch die aktive Zone zerrüttet worden ist. Deswegen dürfen wir Vulkanausbrüche in erster Linie in stark gestörten Gebieten erwarten oder an den Rändern großer Einbrüche, die Zerrungen hervorrufen, eine direkte Abhängigkeit der Eruptionen von präexistierenden Spalten scheint jedoch nicht zu bestehen. Wenn aber zähflüssiges Magma, das ursprünglich unter sehr hohem Drucke stand, in höhere Teile der Erdkruste gepreßt wird, so wird durch Druckerniedrigung eine weitere Verflüssigung eintreten müssen. Es werden alsdann die unter sehr hohem Druck vom Magma absorbierten Gase austreten und ihnen fällt weiter die tätigste Rolle im Spiel der effusiven vulkanischen Kräfte zu; das Magma selbst folgt meist passiv dem Wege, den die Gasexplosionen vorgezeichnet haben.

Wenn dieser Gedankengang richtig ist, so sind Gebirgsbildung und Vulkanismus auf die gleiche Ursache, nämlich auf Druck und Zug innerhalb der aktiven Zone zurückzuführen. Damit wird aber die zweite, von uns ins Auge gefaßte Möglichkeit verneint: daß nämlich Krustenbewegungen tektonischer Art für sich allein und direkt vulkanische Tätigkeit hervorzurufen vermögen. Krustenbewegungen sind für die vulkanische Tätigkeit insofern nur von Bedeutung, als sie den Austritt von Magma in höhere Teile der

Erdkruste, eventuell bis an die Erdoberfläche, begünstigen und lokalisieren.

Die dritte Frage ist die, ob vulkanische Ereignisse imstande sind, direkt tektonische Störungen hervorzurufen. Diese Frage wurde bekanntlich in L. v. BUCH'S Theorie der Erhebungskratere in weitestem Sinne bejaht; gegen seine Anschauungen wurde frühzeitig von POULETT SOROPE und anderen Vulkanisten Einspruch erhoben; sehr viel später erst wurde auch von seiten der Gebirgsforscher, besonders von SUESS und HEIM die Unhaltbarkeit der BUCH'Schen Lehre erkannt. Jedoch wurde dabei das Kind wohl mit dem Bade ausgeschüttet, denn man hat neuerdings an verschiedenen Punkten Beobachtungen gemacht, die dem vulkanischen Magma in einzelnen Fällen eine gewisse aktive Rolle gegenüber dem Nebengestein zusprechen. Nach den Forschungen GILBERT'S im westlichen Nordamerika, den epochemachenden Arbeiten von BRANCA und FRAAS am Ries und Steinheimer Becken, nach den schönen Aufnahmen von BURCKHARDT und BÖSE in Mexiko kann es nicht mehr zweifelhaft sein, daß aufsteigendes Magma imstande ist, Verschiebungen in den äußeren Teilen der Erdoberfläche herbeizuführen. Trotzdem handelt es sich wohl nur um vereinzelte Fälle, die man nicht verallgemeinern darf. Man wird deswegen noch nicht zu der BUCH'Schen Hypothese zurückkehren, nach der sämtliche Gebirge der Erde durch empordringende Magmamassen aufgerichtet worden sind. Aber man muß es als möglich ansehen, daß heutigentags Erdbeben dadurch entstehen können, daß intrusives Magma sich in die Gesteine der äußeren Erdkruste eindringt.

b) Kohlenbildung und Gebirgsaufrichtung.

Während die Beziehungen zwischen Vulkanismus und Tektonik uns vor sehr schwierige Fragen stellen, ist das Verhältnis zwischen Kohlenbildung und Gebirgsaufrichtung sehr viel leichter zu erkennen.

In vielen Fällen, z. B. in Mittel- und Westeuropa während der Carbonzeit, wurde durch Krustenbewegungen dem Meere erst der Boden entrissen, auf dem sich die kohlenbildenden Waldmoore ansiedeln konnten; dieser jungfräuliche Boden war, wie FRECH mit Recht hervorhebt, reich an mineralischen Nährstoffen. Wahrscheinlich wurde aber auch das Klima durch die Gebirgsbildung

in einem für die Kohlenbildung günstigen Sinne beeinflusst, insofern als in der Nachbarschaft der carbonischen Hochgebirge die Temperaturen sanken und die Niederschlagsmengen sich erhöhten. Schließlich lieferten aber die Gebirge den Detritus, der die Carbon- und Tertiärmoore von Zeit zu Zeit bedeckte und vor frühzeitiger Zerstörung schützte.

c) Beziehungen zwischen Eiszeiten auf der einen, Vulkanismus, Gebirgsaufrichtung und Kohlenbildung auf der anderen Seite.

Auf größere Schwierigkeiten stößt man wieder, wenn man versucht, die Ausgestaltung des Klimas, besonders das Auftreten von Eiszeiten in Zusammenhang mit Vulkanismus, Gebirgsbildung und Anhäufung von Pflanzenresten zu bringen.

Nach FRECH wird der Abkühlungsprozeß, der schließlich zur Eiszeit führt, im Carbon wie im Tertiär dadurch hervorgerufen, daß sehr große Mengen von Kohlensäure der Atmosphäre entzogen werden. Teils werden sie bei der Umbildung von Silikaten zu Carbonaten verbraucht, die im Zusammenhange mit der Zerstörung der Hochgebirge eintritt, teils werden sie von den Pflanzen assimiliert, die den Kohlenstoff der atmosphärischen Kohlensäure in den Kohlenflözen festlegen. Nach FRECH ist es die fortschreitende Abkühlung, die der Bildung der Kohlenflöze ein Ende bereitet; diese Quelle des Kohlensäureabflusses verstopft sich also gewissermaßen automatisch. Erst die Wiederbelebung der vulkanischen Tätigkeit soll im Mittelrotliegenden wie in der Alluvialperiode eine neuerliche Erwärmung und im Zusammenhang damit eine schwache Flözbildung zur Folge haben.

Gegen diesen von FRECH angenommenen Zusammenhang zwischen Klimabildung und Kohlenanhäufung hat bereits SOLGER¹ Stellung genommen. Er betont mit Recht, daß in der Dyas auf das feuchte und kühlere Klima des Carbons eine heiße und trockene Wüstenzeit folgte. Allerdings wird dieses Extrem der dyadischen Klimaentwicklung erst am Schlusse der Periode erreicht; aber ich möchte annehmen, daß von hier bis zu dem kühleren Klima des Carbons und untersten Rotliegenden allmähliche Übergänge

E. SOLGER, Die Moore in ihrem geographischen Zusammenhange. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin. 1905. p. 702.

hinüberführen. Die rotgefärbten, meist grobklastischen Gesteine des Rotliegenden deuten auf ein zwar noch feuchtes, aber bereits recht warmes Klima hin. Daraus läßt sich aber mit SOLGER schließen, daß es nicht eine Herabsetzung, sondern eine Erhöhung der Temperaturen war, die im Rotliegenden die weitere Ausbildung von Kohlenflözen unterband.

Außerdem möchte ich glauben, daß die Abkühlung nicht erst mit der Bildung der Kohlenflöze begann, sondern ihr vorausging und sie begünstigte. Schon im Eocän, das noch recht arm an Kohlenflözen ist, scheinen die Temperaturen zu sinken und mancherlei macht mich glauben, daß auch das Untercarbon bereits ein ziemlich kühles Klima besaß.

Ich möchte daher den von SOLGER formulierten Satz unterschreiben: „Das Primäre ist die Klimaschwankung, das Sekundäre die Kohlenentwicklung.“

Ich glaube aber, noch etwas weiter gehen zu können. Ich möchte annehmen, daß der Abkühlungsvorgang nicht nur die Kohlenbildung, sondern auch Gebirgsaufrichtung und vulkanische Tätigkeit zur Folge gehabt hat.

Als Grundursache der Krustenbewegungen sehen wir heute ziemlich allgemein die fortschreitende Abkühlung des Erdkernes an; diese aber schreitet sicherlich, nachdem sich einmal eine feste Außenkruste gebildet hat, in einem sehr langsamen Tempo fort. Trotzdem muß aber das Tempo der Abkühlung sich verändern, wenn die Temperaturen an der Erdoberfläche eine starke Schwankung erleiden. Man darf wohl nicht annehmen, daß eine Temperaturveränderung von 5 oder 10°, die das Klima an der Erdoberfläche bereits gänzlich umgestalten muß, für sich allein imstande ist, durch Verstärkung der Kontraktion im Erdinneren eine Gebirgsbildung hervorzurufen. Wohl aber wird sie fähig sein, auf bereits vorhandene Spannungen auslösend zu wirken. Scheinen ja doch sogar die kleinen Differenzen des Luftdruckes für die Erdbeben nicht bedeutungslos zu sein. Diese Auslösung wird desto leichter dann erfolgen können, wenn eine lange Zeit der Erdruhe vorausging, in der die Spannungen im Erdinneren einen hohen Grad erreichen konnten.

Nachdem einmal die Gebirgsaufrichtung in ihr erstes Stadium eingetreten war, mußten sich die Wärmeverluste des Erdinneren steigern. Tiefgelegene Teile der Erdkruste wurden an die Ober-

fläche emporgepreßt und gaben dort ihre ursprünglich hohe Temperatur ab. Zugleich entzogen aber auch die im Gefolge der Krustenbewegungen ausbrechenden Laven, Gase und heiße Quellen dem Erdinneren gewaltige Massen von Wärme¹. Dadurch aber mußte immer wieder die Kontraktion und der gebirgsbildende Vorgang gesteigert werden; in analoger Weise verstärkt sich die Tätigkeit eines Geisers beim weiteren Fortschreiten des Prozesses von selbst, bis schließlich völlige Erschöpfung eintritt.

Wenn nun tiefere Teile der Erdkruste durch Gebirgsbildung und vulkanische Tätigkeit Wärme verloren, so mußten sich gleichzeitig die Temperaturen an der Erdoberfläche erhöhen; denn erhitzte Substanzen wurden ja bei diesen Prozessen von innen nach außen transportiert. Dazu kam aber noch eine Steigerung der atmosphärischen Kohlensäuremenge, die im Gefolge der vulkanischen Eruptionen eintrat.

Wenn nun sowohl im Carbon wie im Tertiär der Gebirgsaufrichtung nicht unmittelbar eine Erwärmung, sondern eine weitere Abkühlung folgte, so kann dies auf zwei verschiedenen Wegen erklärt werden. Erstens konnte der Kohlensäureverbrauch durch Bildung von Carbonaten und Kohlenflözen derartig gesteigert werden, daß er die Produktion der Kohlensäure auf vulkanischem Wege überstieg. Zweitens aber konnte der Abkühlungsprozeß, durch den nach unserer Auffassung die Auslösung der Krustenbewegungen herbeigeführt wurde, noch weiter fortwirken. Wenn sich aber trotz der gewaltigen Umwälzungen an der Erdoberfläche die Abkühlung weiter fortsetzte, so liegt der Gedanke nahe, ihre Ursache nicht in tellurischen, sondern in kosmischen Erscheinungen zu suchen.

So sehen wir denn, daß Abkühlung, Gebirgsaufrichtung, Vulkantätigkeit und Kohlenbildung Erscheinungen sind, die keineswegs unabhängig voneinander und gewissermaßen zufällig in einzelnen Perioden zusammentreffen. Nach unserer Auffassung treten vielmehr diese Phänomene in mannigfaltige Wechselbezie-

Es sei hier auch auf die Rolle hingewiesen, die möglicherweise das Radium bei diesen Vorgängen spielen könnte. Vergl. F. v. WOLFF, Die vulkanische Kraft und die radioaktiven Vorgänge in der Erde. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 60, 1908. p. 431.

hungen und bedingen einander. Höchstwahrscheinlich ist aber die Abkühlung das Primäre, ist also als Grundursache für alle übrigen Erscheinungen anzusehen.

Wenn das richtig ist, so müssen auch die Größenverhältnisse der einzelnen Erscheinungen einander angenähert proportional sein, d. h. einer sehr lebhaften Gebirgsbildung muß auch eine starke Temperaturherabsetzung, bezw. allgemeine Vereisung entsprechen. Diesem Schlusse scheint die landläufige Auffassung der Vorgänge im Permocarbon zu widersprechen, die v. WOLFF¹ mit den Worten wiedergibt: „Es läßt sich mit Sicherheit erkennen, daß im Laufe der Erdgeschichte die zyklisch wiederkehrenden Vereisungen an Intensität zugenommen, daß aber die Gebirgsfaltungen an Intensität und Umfang abgenommen haben.“ Ebenso seien die Zeiten erhöhter vulkanischer Aktivität kürzer geworden.

Wie die Dinge für die untercambrische Vereisung liegen, läßt sich bei dem äußerst geringen Material, das aus dieser Periode vorliegt, nicht übersehen. Darin, daß im Permocarbon Gebirgsfaltung und Vulkantätigkeit intensiver waren als im Tertiär, stimme ich v. WOLFF durchaus bei. Damit im Zusammenhang steht wohl die intensivere Kohlebildung der älteren Periode. Es muß aber auch die jungpaläozoische Temperaturherabsetzung kräftiger, vielleicht auch länger andauernd gewesen sein als die quartäre. Große Inlandeismassen in der Nähe der Wendekreise und selbst in der Nachbarschaft des Äquators (Togo und Kongo-becken) sind nur denkbar, wenn die Temperaturen an der gesamten Erdoberfläche sehr stark herabgesetzt werden.

11. Über einige Eiszeithypothesen.

Wenn man eine Hypothese, die zur Erklärung bestimmter Beobachtungen aufgestellt worden ist, ablehnt oder ihr nur eine beschränkte Bedeutung zuspricht, so fühlt man sich gewissermaßen moralisch verpflichtet, eine andere an ihre Stelle zu setzen. Leider ist es mir nicht möglich, dieser Pflicht vollständig zu genügen; der anscheinend so fest gegründeten und bis in alle Einzelheiten ausgebauten Kohlensäurehypothese kann ich nichts Ent-

¹ Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 60. 1908. p. 456.

sprechendes an die Seite stellen. Aber ich will doch wenigstens Farbe bekennen und angeben, in welcher Richtung die Ursachen der großen geologisch-historischen Klimaschwankungen nach meiner Auffassung zu liegen scheinen.

Es liegt mir durchaus fern, in eine gründliche und auch nur einigermaßen vollständige Revision der unendlich vielen, bisher aufgestellten Eiszeithypothese mich einlassen zu wollen. Eine solche würde Bände füllen und ein sehr viel größeres Verständnis für physikalische und astronomische Fragen erfordern, als ich es besitze. Dabei würde das Resultat in gar keinem Verhältnis zu der angewandten Mühe stehen. Ich will lediglich einige Punkte, auf die in neuerer Zeit besonders von geologischer Seite hingewiesen worden ist, herausgreifen und versuchen, zu ihnen Stellung zu nehmen.

a) Erklärungsversuche auf morphologischer Grundlage.

Zunächst muß ich mich noch einmal mit der Frage beschäftigen, ob die Äußerungen eines veränderten Klimas in der Vorzeit lokalen oder allgemeinen Charakter besitzen.

Diese Frage scheint am leichtesten für die quartäre Eiszeit zu beantworten zu sein, da wir von dieser Klimaschwankung das meiste Material besitzen. Die Mehrzahl der Forscher nimmt wohl heute an, daß die quartäre Klimaschwankung die ganze Erde gleichzeitig betroffen hat; sie äußerte sich in einer allgemeinen Herabsetzung der Temperaturen, die im Maximum etwa 5° erreichte, sowie in einer an vielen Orten auftretenden Steigerung der atmosphärischen Niederschläge. Daher trat diese Klimaschwankung in höheren Breiten und in den Hochgebirgen als Eiszeit, in den niederen Breiten als Pluvialperiode auf. Eine derartige allgemeine, auf der ganzen Erdoberfläche gleichzeitig auftretende Klimaschwankung ist aber nur zu erklären, wenn man eine kosmische Ursache oder eine Veränderung der Erdatmosphäre annimmt.

Nur eine kleine Anzahl von Forschern, unter ihnen allerdings der so gründliche Kenner des nordischen Quartärs E. GEINITZ, nimmt heute noch an, daß die Vereisung durch Veränderungen in der Höhe und in den Umrissen der Festländer erklärt werden könne. „Europa wie Amerika waren bedeutend größer, sie er-

hoben sich breiter und höher über das Meer“, so schreibt GEINITZ¹. Skandinavien lag in der Präglazialzeit nach seiner Anschauung mindestens 400 m, Schottland 90 m höher als in der Gegenwart; Großbritannien war damals mit dem Kontinente verbunden, im Norden wurde dem Golfstrom der Zutritt zum Eismeere durch eine Landverbindung zwischen Europa und Grönland verwehrt, die wahrscheinlich aus einer Reihe von Inseln und Halbinseln bestand.

Die Einwirkung dieser Konfiguration auf das Klima Europas hat KÜMMELL² geschildert; sie dürfte im allgemeinen darin bestehen, daß die Minima während des Winters ihre Zugstraßen weiter nach Süden verlegten. „Daß eine solche Druckverteilung mehr kontinentales Winterklima, d. h. Temperaturerniedrigung auf die jetzigen Küstenländer gebracht haben muß, ist ohne weiteres einzusehen.“ Zugleich wird aber betont werden müssen, daß die Gebirge Skandinaviens trotz ihrer von GEINITZ angenommenen größeren Höhe viel weniger Niederschläge erhielten, wenn die norwegischen Küsten nicht mehr von einem warmen Meere bespült wurden und wenn die Minima ihre hauptsächlichsten Zugstraßen weiter nach Süden verlegten. Das Klima Europas wird, wenn man GEINITZENS Konstruktion zugrunde legt, sicherlich kontinentaler, aber damit keineswegs für die Vereisung günstiger. Gerade GEINITZ ist es aber, der die Vereisung aus einer Vermehrung der Niederschläge, nicht aus dem Sinken der Temperaturen erklären will. Selbst aber wenn auf dem von GEINITZ vorgeschlagenen Wege eine Vereisung von Nordeuropa und Nordamerika zu erklären wäre, so würde immer noch die stärkere Eisbedeckung der tropischen Hochgebirge und die Pluvialperiode in niederen Breiten unerklärt bleiben.

Näher liegt es, die Erscheinungen der permischen und der untercambrischen Vereisung auf eine besonders günstige Verteilung von Wasser und Land und auf die Höhenlage einzelner Kontinentalgebiete zurückzuführen. Ich habe bereits ausgeführt, daß wahrscheinlich nur ein kleiner Teil dieser alten Glazialbildungen überhaupt erhalten geblieben ist, von diesem ist aber wiederum nur ein Bruchteil bekannt. Welche Ausdehnung die Eismassen im Perm besaßen, wird sich nie auch nur mit annähernder Genauigkeit feststellen lassen; daß sie aber nicht auf die Gebiete beschränkt

¹ Wesen und Ursache der Eiszeit. Güstrow 1905.

Ebenda. p. 9.

waren, aus denen wir heute permische Grundmoränen kennen, erscheint mir ganz zweifellos. Inlandeismassen, die in tropischen und subtropischen Gebieten bis an das Meer hinabreichen, sind nur dann denkbar, wenn auf der gesamten Erdoberfläche die Temperaturen außerordentlich stark gesunken sind.

Daß eine Erklärung der Eiszeit auf morphologischer Basis nicht durchführbar ist, zeigt aufs deutlichste ein Blick auf die heutigen Verhältnisse in den Polargebieten. Arktis und Antarktis sind morphologisch so verschieden, wie nur irgend denkbar. Am Nordpol haben wir ein tiefes Meer, das fast überall von Kontinenten oder Inseln eingeschlossen ist, am Südpol ausgedehnte und teilweise hoch liegende Landmassen, die rings vom offenen Weltmeere umspült werden.

Trotz dieser morphologischen Gegensätze sind beide Polargebiete in der Quartärzeit, wahrscheinlich gleichzeitig, mit Eis bedeckt worden. Manches deutet darauf hin, daß die polaren Eismassen auf beiden Hemisphären zur Zeit des maximalen Eisstandes ungefähr gleiche Ausdehnung besaßen. Auf das Konto der morphologischen Verschiedenheiten ist dagegen hauptsächlich die Tatsache zu setzen, daß die Eismassen im Süden langsamer zerstört werden als im Norden, daß daher in der Antarktis bis zu einem gewissen Grade die Vereisung noch anhält.

Sicherlich müßten mich persönliche Erfahrungen geneigt machen, den Einfluß morphologischer Bedingungen auf das Klima eher zu überschätzen als zu gering anzuschlagen. Aber ich vermag nicht, eine Klimaschwankung, die auf der ganzen Erde wahrnehmbar ist, mit lokalen Ursachen zu erklären; ein Phänomen von allgemeiner Verbreitung muß auch eine allgemein wirksame Ursache haben.

Es braucht kaum besonders hervorgehoben zu werden, daß mit einer Verlegung der Erdpole der Eintritt einer allgemein verbreiteten und überall in dem gleichen Sinne sich äußernden Klimaschwankung nicht erklärt werden kann. Eine Verlegung der Pole könnte nur eine Verlegung der Klimazonen hervorrufen, um eine solche handelt es sich aber bei den vorweltlichen Klimaschwankungen nicht. Wir mögen im Tertiär oder im Mesozoicum die Erdpole verlegen, wohin wir wollen, nirgends könnten wir in ihrer Nachbarschaft Glazialerscheinungen wahrnehmen. Das, wie es scheint, feststehende Faktum, daß in vielen Perioden die Polar-

gebiete nicht vereist gewesen sind, können wir nicht aus der Welt schaffen, wenn wir die Pole auch noch so weite Wanderungen ausführen lassen.

b) Allgemein tellurische Ursachen.

Wir dürfen als wahrscheinlich ansehen, daß die Klimaschwankungen der Vorzeit in gleichem Sinne den gesamten Erdball betührten und daß sie von der Ausgestaltung der Erdoberfläche zwar modifiziert, nicht aber von ihr hervorgerufen wurden. Diese Erkenntnis läßt uns nach Ursachen von allgemeiner Bedeutung suchen, die ihren Sitz entweder auf oder außerhalb der Erde gehabt haben können.

Von allgemein wirksamen, tellurischen Faktoren kommen anscheinend nur Veränderungen der irdischen Atmosphäre in Betracht. Die in größeren Mengen vertretenen einfachen Gase, Stickstoff, Sauerstoff und Argon spielen wegen ihrer minimalen Absorption der Wärmestrahlen keine wesentliche Rolle; von Bedeutung sind trotz ihrer quantitativ geringen Beteiligung allein die zusammengesetzten Gase und von diesen wiederum nur Wasserdampf und Kohlensäure.

A. Wasserdampf.

Die Rolle, welche der Wasserdampf bei der Klimabildung spielt, wird sehr verschieden aufgefaßt. Nach HARBOË¹ wirkt eine Vermehrung des Wasserdampfes abkühlend auf die Erdoberfläche, indem Regentropfen und Eiskristalle ihr die niederen Temperaturen der höheren Luftschichten mitteilen. Hervorgerufen soll der erhöhte Gehalt der Atmosphäre an Wasserdampf durch vulkanische Explosionen werden. HARBOË ist es natürlich nicht entgangen, daß im Tertiär-Quartär Maximum der Vulkantätigkeit und Vereisung nicht zusammenfallen; er sieht sich daher zu der Annahme genötigt², daß „die Vereisungen sich durch die Tertiärzeit entwickelt haben, und das Pleistocän eigentlich zunächst nur die Abschmelzperiode gewesen ist.“ Wenn diese Auffassung richtig

¹ HARBOË, Vulkanismus und Vereisung. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 50. 1898. p. 441.

² HARBOË, Erwiderung auf die Bemerkung des Herrn SEMPER etc. Ebenda. 51. 1899. p. 596.

wäre, was nach meinem Gefühl nicht der Fall ist, so hätte sie doch nur für die erste der quartären Eiszeiten Berechtigung. Die späteren, durch lange Interglazialzeiten voneinander getrennten Vereisungen würden sich auf diesem Wege nicht mehr erklären lassen, es sei denn, daß man für die Quartärzeit ein starkes und ziemlich regelmäßiges Intermittieren der vulkanischen Tätigkeit annehmen will.

Es scheint zwar, daß bei vulkanischen Explosionen oftmals große Mengen von Wasserdampf produziert werden, daß diese aber für längere Zeit der Atmosphäre nicht zugute kommen. M. SEMPER¹ hat bereits mit Recht darauf hingewiesen, daß sich der von den Vulkanen ausgestoßene Wasserdampf zum größten Teile schon in unmittelbarer Nähe des Kraters zu vulkanischem Regen kondensiert, also nur von lokaler Bedeutung sein kann.

Die Hypothese von HARBOË berührt sich nahe mit der von DE MARCHI²; nach ihm ist die Ursache der Klimaverschlechterungen in einer Trübung (intorbidimento) der Atmosphäre zu suchen, die durch einen vergrößerten Gehalt an (kondensiertem) Wasserdampf herbeigeführt wird. Die verringerte Durchlässigkeit der Atmosphäre würde zur Folge haben eine Herabsetzung der Temperaturen auf der gesamten Erdoberfläche. Diese würde gering im Tropengebiet sein, mit der Breite bis zum 70. Parallelkreise wachsen und in der Polarregion sich wieder etwas verringern. In außertropischen Gebieten würde die Temperatur stärker über den Kontinenten als über den Meeren sinken, die Unterschiede des Luftdruckes würden sich dementsprechend verringern und feuchte ozeanische Luft könnte leichter die Kontinentalgebiete bestreichen. Die Kontinente würden also gleichzeitig eine Abkühlung und eine Vermehrung der Niederschläge erfahren, es wären demnach die günstigsten Bedingungen für eine Vereisung gegeben.

Im Tertiär hingegen hätte nach DE MARCHI die Atmosphäre einen geringeren Feuchtigkeitsgehalt und daher größere Durchlässigkeit für Licht und Wärme besessen. Das Klima war daher in jener Periode auf der ganzen Erde heißer und zugleich trockener.

Wodurch die Vermehrung des Wasserdampfes in der irdischen Atmosphäre erfolgte, läßt DE MARCHI offen. Recht wahrscheinlich

¹ M. SEMPER, Eine Bemerkung zu Herrn HARBOË's Aufsatz über „Vereisung und Vulkanismus“.

² DE MARCHI, Le cause dell' era glaciale. Pavia 1905.

erscheint ihm die Hypothese, daß vulkanische Tätigkeit den Wasserdampfgehalt der Luft gesteigert hat; aber er gesteht offen ein, daß die Statistik des 19. Jahrhunderts einen Zusammenhang zwischen Eruptionen und entsprechenden Klimaänderungen nicht erkennen läßt.

Es fragt sich aber, ob eine Vermehrung des Wasserdampfes in der Atmosphäre überhaupt imstande ist, die Temperaturen herabzusetzen oder ob nicht vielleicht eher die umgekehrte Wirkung stattfinden muß. Es ist ja wohl zweifellos, daß durch eine vermehrte Bewölkung auch die Sonnenstrahlen stärker reflektiert werden, daß also die Wärmemenge, welche die Erdoberfläche von der Sonne erhält, eine Verringerung erleidet. Es ist aber sehr wohl möglich, daß dieser Verlust durch die stärkere Erwärmung der Atmosphäre, die sowohl bei Durchgang der Sonnenstrahlen wie bei dem der Erdstrahlen durch Absorption erfolgt, kompensiert und überkompensiert werden kann. Diese Anschauung wird von ARRHENIUS vertreten.

Nach seiner Ansicht wird ein Teil der von der Sonne der Erde zugestrahlten Wärme wie von der von der Erde in den Weltraum zurückgestrahlten Wärme von dem Wasserdampf der Erdatmosphäre zurückgehalten. Nimmt man mit ÅNGSTRÖM¹ die Dicke der absorbierenden Schicht von Wasserdampf (auf flüssiges Wasser reduziert) auf 2,1 cm an, so werden 15 %, bei 9,9 cm Wasserdicke 27 % der Sonnenstrahlung absorbiert. Wenn die Menge des Wasserdampfes steigt, so wird also weniger Sonnenwärme bis zur Erdoberfläche gelangen, dafür wird aber die Atmosphäre stärker erwärmt werden.

Wie sich der Wasserdampf der Atmosphäre gegenüber der Erdstrahlung verhält, ist noch nicht genau untersucht worden. Besondere Schwierigkeiten macht es, seine Wirkung von der des fein verteilten Staubes zu unterscheiden. Nach Ansicht von ARRHENIUS dürfte aber das Absorptionsvermögen des Wasserdampfes das der Kohlensäure nicht unerheblich übersteigen. Auf alle Fälle aber wirken Wasserdampf und Kohlensäure wie eine schützende Decke, welche die Wärmeverluste der Erdoberfläche herabsetzt. Bei steigendem Gehalt an Wasserdampf in der Atmosphäre würde das Klima auf der ganzen Erde wärmer, aber auch gleichmäßiger

¹ Vergl. ARRHENIUS, Kosmische Physik. Leipzig 1903. p. 505.

und feuchter werden, wie bereits auf p. 108 ausführlich nach ARRHENIUS dargestellt worden ist.

Es kann aber, wie ebenfalls ARRHENIUS sehr treffend betont, die erste Wärmezunahme nicht durch eine Erhöhung des Wasserdampfgehaltes in der Luft herbeigeführt worden sein. Erst wenn durch eine andere Ursache die Wärme überhaupt gesteigert worden ist, kann auch die Menge des Wasserdampfes wachsen und ihre soeben geschilderten Wirkungen ausüben. Wäre der Wasserdampf imstande, bei der Erhöhung der Lufttemperatur die Initiative zu ergreifen, so müßte sich dieser Vorgang andauernd abspielen und auch heute noch in kurzer Zeit zu sehr hohen Temperaturen an der Erdoberfläche führen. Durch Verdunstung an der Meeresoberfläche würde der Wasserdampfgehalt der Luft erhöht, dadurch würde die Wärme gesteigert werden, dies würde erneute Verdunstung hervorrufen, kurz, man hätte da eine Schraube ohne Ende. Wenn dieser Prozeß nicht so verläuft, so liegt dies daran, daß sich der Wasserdampf kondensiert, wenn die erhitzte Luft in die Höhe steigt und sich dabei abkühlt. Die primäre Steigerung der Temperatur kann also nicht von dem leicht kondensierbaren Wasserdampf herrühren, sondern muß von einem zusammengesetzten Gase herbeigeführt werden, das unter „gewöhnlichen“ Temperatur- und Druckverhältnissen seinen Aggregatzustand nicht ändert. Dieses Gas ist aber nach Ansicht von ARRHENIUS die Kohlensäure.

B. Kohlensäure.

Die von ARRHENIUS aufgestellte und von FRECH weiter ausgebauten Kohlensäurehypothese hat im allgemeinen eine recht günstige Aufnahme gefunden. Trotz einiger neuerdings gegen sie gerichteten Angriffe ist man auch heute noch vielfach der Ansicht, daß sie die einzige ist, welche die Klimaschwankungen der Vorwelt zu erklären vermag. Dies ist jedoch auf alle Fälle über das Ziel hinausgeschossen. Ernstlich wird die Kohlensäure wohl nur in Verbindung mit unperiodischen oder langperiodischen Klimaschwankungen gebracht werden können. Zweifellos wird niemand die 35jährigen BRÜCKNER'schen Klimaperioden auf entsprechende Schwankungen im Kohlensäuregehalte der Atmosphäre zurückzuführen versuchen. Diesen ähnliche Klimaänderungen von allerdings größerer Periodendauer und sicher auch

stärkerer Intensität spielen aber wahrscheinlich eine sehr viel größere Rolle, als man bisher anzunehmen geneigt ist. In einem früheren Aufsatz¹ habe ich ausgeführt, daß vielleicht die Schichtung der Sedimente teilweise auf ihnen beruht.

Die Frage, ob die Kohlensäure der Atmosphäre an den großen unperiodischen oder langperiodischen Klimaschwankungen beteiligt ist, läßt sich nicht mit einem glatten Ja oder Nein beantworten. Was sich bei der Unsicherheit der geologischen Überlieferung erzielen läßt, ist im besten Falle ein gewisser Grad von Wahrscheinlichkeit; diese aber spricht dagegen, der Kohlensäure eine ausschlaggebende Bedeutung einzuräumen.

Ich nehme hier an, es sei durch einwandfreie Beobachtungen erwiesen, daß die Steigerung der heutigen Kohlensäuremenge um ihren doppelten Betrag eine Erhöhung der Temperatur um 4°, eine Verminderung der Kohlensäure um die Hälfte eine Senkung um den gleichen Wert hervorrufen müsse. Es solle dann durch eine vulkanische Explosion, vergleichbar der des Krakatoa oder Mont Pelée, die atmosphärische Kohlensäure plötzlich auf den doppelten Betrag erhöht worden sein. Dann würde wohl der vorausberechnete thermische Effekt eintreten, aber nur relativ kurze Zeit anhalten. Ein großer Teil der zugeführten Kohlensäure würde vom Meere absorbiert werden; wie viel dadurch der Atmosphäre entzogen wird, hängt von der Temperatur und dem Salzgehalt der Meere ab, das Tempo, in dem sich die Absorption vollzieht, steht hingegen in Abhängigkeit von der Ausdehnung und Wasserbewegung der Meere. Dies alles aber sind Faktoren, die sich für die Vorwelt nicht mit Sicherheit feststellen lassen.

Umgekehrt wird ein Verlust, den die atmosphärische Kohlensäure erleidet, zum größten Teile aus den Kohlensäurereserven des Meeres gedeckt werden.

So besteht denn die Kohlensäurebilanz nicht nur aus zwei Posten, der Einnahme, die von den Vulkanen geliefert wird, und der Ausgabe, wohin die Entnahme von Kohlensäure zur Bildung von Carbonaten und von Kohlenflözen gehört. Es wird vielmehr bei steigenden Einnahmen der größte Teil der Kohlensäure dem riesigen Reservefonds des Meeres überwiesen, wenn aber die Ein-

¹ E. PHILIPPI, Über das Problem der Schichtung und über Schichtbildung am Boden der heutigen Meere. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 60. 1908. p. 346.

nahme von der Ausgabe überstiegen wird, so wird zunächst das Defizit zum größten Teile aus diesen Reserven bestritten. Es schließt also in der Kohlensäurebilanz, um bei dem Bilde zu bleiben, Einnahme und Ausgabe ungefähr mit den gleichen Ziffern, Gewinn- oder Verlustsaldo bleiben trotz vielleicht sehr großer Umsätze geringfügig.

Nun können sich natürlich im Laufe von sehr langen Zeiten auch verhältnismäßig kleine Überschüsse oder Defizits zu beträchtlichen Posten summieren und diese müßten dann eine entsprechende Wirkung auf das Klima an der Erdoberfläche ausüben. Ein lange andauerndes Kohlensäuredefizit müßte eine Abkühlung, eine Häufung von Überschüssen eine Erwärmung hervorrufen. Nun wird atmosphärische Kohlensäure andauernd an der Erdoberfläche verbraucht, ergänzt kann aber der Bestand im wesentlichen nur auf vulkanischem Wege werden. Man müßte daher annehmen, daß wärmere Klimaperioden mit starker Vulkan-tätigkeit zusammenfallen. Dies versucht FRECH zu beweisen; aus den Ausführungen im ersten Teile dieser Arbeit dürfte aber hervorgehen, daß sich die bisher bekannten geologischen Daten viel leichter gegen als für seine Anschauung verwerten lassen.

Ich nehme natürlich nicht an, daß in der Vorwelt der Kohlensäuregehalt der Atmosphäre nicht geschwankt hätte. Wenn ich aber überhaupt Schwankungen der atmosphärischen Kohlensäuremenge anerkenne, so muß ich auch zugestehen, daß durch diese gewisse Klimaveränderungen herbeigeführt sein müssen. Höchst wahrscheinlich aber waren sie nicht sehr beträchtlich und wurden teilweise maskiert durch andere, größere Klimaschwankungen, deren Grund nicht in der irdischen Atmosphäre lag.

Wir kommen also zu dem Schlusse, daß weder morphologische noch allgemein tellurische Faktoren imstande sind, für sich allein die vorweltlichen Veränderungen des Klimas zu erklären. Man könnte aber wohl daran denken, daß eine Kombination dieser Faktoren zum Ziele führen könnte. Diesen Weg haben CHAMBERLIN¹ und SALISBURY mit einer sehr interessanten Hypothese beschritten.

Diese Forscher sehen die Gebirgsbildung im Carbon und am Ende der Tertiärzeit als Grundursache für die Abkühlung an;

¹ CHAMBERLIN and SALISBURY, *Geology*. New York 1907. 2. 658; 3. 432.

sie glauben also, entgegen der hier vertretenen Anschauung, daß Abkühlung den tektonischen Ereignissen folgte, nicht ihnen vorausging. Durch die Krustenbewegungen wurden die Kontinentalmassen vergrößert und die Meere entsprechend zurückgedrängt und vertieft. Das Klima wurde im allgemeinen kontinentaler, im Zusammenhang mit den Veränderungen an der Erdoberfläche erhielten auch die Luftströme andere Bahnen und eine größere Beschleunigung. Es sank aber auch der Feuchtigkeitsgehalt der Luft und ebenso verminderte sich ihre Kohlensäuremenge, weil große Mengen dieses Gases zur Bildung von Kohlenlagern und zur Carbonisierung von Silikaten verwandt wurden. Alle diese Prozesse führten zu einer erheblichen Herabsetzung der Temperaturen an der Erdoberfläche.

CHAMBERLIN und SALISBURY stehen aber nicht wie FRECH auf dem Standpunkte einer einheitlichen Eiszeit, sondern nehmen mehrere Vereisungen und Interglazialzeiten von allerdings recht verschiedener Dauer an. Es ist nun sehr interessant, wie die beiden Forscher ohne Zuhilfenahme von Krustenbewegungen, Vulkantätigkeit oder von kosmischen Faktoren den Wechsel milderer und strengerer Perioden im Quartär zu erklären versuchen.

Sie gehen aus von dem Klima der Tertiärperiode, in der Feigen und Magnolien auf dem Boden Grönlands wuchsen. In dieser Zeit, wie wohl in allen übrigen Perioden, war die Verdampfung und im Zusammenhange damit die absolute Luftfeuchtigkeit in niedrigen Breiten größer als in höheren. Die am Äquator aufsteigenden und nach Nord und Süd abfließenden Luftströme mußten also dem Tropengebiet Feuchtigkeit entziehen und diese der gemäßigten und polaren Zone mitteilen. Durch diesen Prozeß wurde die Meeresoberfläche in niederen Breiten gesenkt, in höheren gehoben, ein kalter Ausgleichsstrom mit stark angesüßtem Wasser mußte von den Polen her dem Äquator zufließen. Der kalte und wenig salzhaltige Oberflächenstrom wurde kompensiert durch einen warmen und salzreichen Unterstrom, der in entgegengesetzter Richtung floß; dieser trat schließlich in der Polarregion an die Oberfläche und trug zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Nach CHAMBERLIN und SALISBURY ist das milde Klima der Polarländer zur Tertiärzeit in erster Linie auf diesen Unterstrom von warmem Äquatorialwasser zurückzuführen.

Der Unterstrom besaß den relativ geringen Kohlensäuregehalt, der ihm am Äquator mitgeteilt worden war. Als er nun in der Polarregion auftauchte, kühlte er sich ab und konnte nunmehr eine größere Menge von Kohlensäure aufnehmen, dadurch mußte aber der Atmosphäre an den Polen Kohlensäure entzogen und die Temperatur herabgesetzt werden.

Nun traten am Schlusse der Tertiärzeit die Krustenbewegungen hinzu, durch die das Klima der Polargebiete weiter ungünstig beeinflusst wurde. Dadurch wurden die polaren Meere immer stärker abgekühlt, sie konnten immer größere Mengen von Kohlensäure aus der Atmosphäre entnehmen, die Temperaturen mußten daher weiter sinken. Als sich schließlich eine Decke von Meereis gebildet hatte, wurden in der Mutterlauge die kohlensauren Salze konzentriert, das Meerwasser wurde übercarbonisiert.

Sobald einmal dieses Stadium erreicht war, nahm der Prozeß den entgegengesetzten Weg. Das Meerwasser, das nunmehr an den Polen durch Ausfrieren salzreicher geworden war, sank hier zur Tiefe und strömte allmählich dem Äquator zu. Dort tauchte es auf und gab bei seiner Erwärmung den Überschuß an Kohlensäure ab, d. h. trug zur Erhitzung der Luftschichten bei. Nun wurde auch die Atmosphäre reicher an Wasserdampf, der seinerseits wieder zur Hebung der Temperaturen beitrug. Das Organismenleben im Meere wurde reicher, auch durch dieses wurden neue Mengen von Kohlensäure produziert. Die riesigen polaren Eismassen gerieten ins Schmelzen; während hier vorher ein großer Teil der Sonnenbestrahlung reflektiert worden war, tauchte nunmehr der dunkle Erdboden auf und absorbierte einen größeren Teil der Wärmestrahlen. Durch die ungeheuren Massen von Schmelzwasser hob sich schließlich der Spiegel der Weltmeere, weite Strecken von Tiefland wurden¹ überflutet. Alle diese Faktoren trugen dazu bei, das strenge Klima der Eiszeit in das mildere einer Interglazialzeit umzuwandeln.

CHAMBERLIN und SALISBURY's Hypothese ist zweifellos sehr geistvoll; besonders besticht ihre Anschauung, daß jede Vereisung von Anfang an den Keim ihrer Zerstörung in sich trägt. Trotzdem kann ich mancherlei Bedenken gegen die Ausführungen der beiden amerikanischen Geologen nicht unterdrücken.

Sie sprechen den Gedanken aus, daß im Tertiär und in der zweiten Hälfte jeder Interglazialzeit die höheren Breiten sehr er-

hebliche Feuchtigkeitsmengen von den niederen erhalten, daß infolgedessen der Spiegel der polaren Meere steigt, der der tropischen sinkt. Diese Anschauung ist jedoch nur zum kleinsten Teile richtig. Von dem Wasserdampf, der in den Tropen emporsteigt, wird der größte Teil dem Tropengebiet selber zurückgegeben; ich brauche nur an die heftigen Regengüsse der Kalmenzone, an die riesigen Niederschlagsmengen, die z. B. in Kamerun gemessen worden sind, zu erinnern. Die Luft, die am Äquator aufsteigt, verliert bei ihrer Abkühlung den ursprünglich reichen Gehalt an Wasserdampf sehr rasch; wenn der äquatoriale Luftstrom in den Roßbreiten wieder zur Erde herabsinkt, so besitzt er nur einen geringen Grad von relativer Feuchtigkeit. Es sind daher nicht nur die aus den subtropischen Hochdruckgebieten zum Äquator zurückfließenden Luftströme, die Passate, sehr trocken, auch die Winde, die aus den Roßbreiten polwärts abströmen, geben nur verhältnismäßig wenig Feuchtigkeit ab. Man darf wohl sagen, daß die gemäßigten Zonen im allgemeinen ihr eigenes Feuchtigkeitsbudget besitzen und nur wenig Anleihen bei der Tropenzone machen.

Im Zusammenhang damit steht der Salzgehalt des Meeresswassers; die Oberflächenschichten süßen sich in höheren Breiten auch nicht entfernt in dem Grade aus, wie es die Hypothese von CHAMBERLIN und SALISBURY verlangt. Im Nordatlantik treffen wir den gleichen Salzgehalt am Äquator wie zwischen dem 50. und 60.^o an, nur im subtropischen Hochdruckgebiet ist die Oberflächenschicht etwas salzreicher, die Differenz beträgt aber durchschnittlich nur 2 ‰. Diese verhältnismäßig gleichförmige Verteilung des Salzgehaltes widerspricht am schärfsten der Annahme, nach der ungeheure Mengen von Feuchtigkeit aus niederen nach höheren Breiten transportiert werden sollen. Die geringen Differenzen im Salzgehalte genügen auch sicher noch nicht, um äquatorwärts gerichtete Oberströmungen hervorzurufen, wie sie CHAMBERLIN und SALISBURY verlangen.

Dabei sind die Unterschiede im Salzgehalte an der Meeresoberfläche heute zweifellos größer als in der Präglazialzeit. In dem viel stärker ausgeglichenen Klima der Tertiärperiode war wohl auch die Verdunstung an der Meeresoberfläche gleichmäßiger als heute. Dazu kommt, daß sich in höheren Breiten dem Meere heute erhebliche Mengen polaren Schmelzwassers beimengen, die in der Präglazialzeit nicht produziert wurden. So ist denn auch

für die heutige, und noch viel mehr für die PrÄglazialzeit die Behauptung unzutreffend, daß sich ein Unterstrom von warmem, salzreichen Wasser von den Tropen nach den Polen hin bewegt und dort an die Oberfläche tritt. Ozeanographische Untersuchungen haben uns gezeigt, daß in tropischen und in gemäßigten Meeren Salzgehalt und Temperatur regelmäßig in der Richtung von oben nach unten abnehmen. Nur am Rande des Polareises schiebt sich eine Schicht von wärmerem und salzreicherem Wasser zwischen eine kältere und salzärmere Boden- und Oberflächenschicht ein. Selbst wenn aber auch im Tertiär ein Strom von warmem, salzreichen Wasser tief unter der Meeresoberfläche vom Äquator nach den Polen floß, so hatte er nicht den geringsten Grund, im Polargebiet aufzutauchen und dieses zu erwärmen. Im Gegenteil, das salzreichere Wasser mußte bei der unausbleiblichen Abkühlung immer tiefer versinken, weil es dichter wurde¹. Sehen wir ja doch, wie auch der Golfstrom, obgleich er ein Oberflächenstrom ist und mit großer Geschwindigkeit fließt, bei Annäherung an das Polarmeer unter kälteres und salzärmeres Wasser untertaucht.

Es findet allerdings auch heute noch ein sehr lebhafter Austausch von kälterem und wärmerem Meereswasser statt und hat in mehr oder minder großem Maßstabe wohl auch in der Vorwelt stets stattgefunden. Allein in der Hauptsache handelt es sich da um Bewegungen an der Meeresoberfläche. Sieht man von dem Schmelzwasser der Polargebiete ab, so beschreiben die bewegten Wassermengen in sich geschlossene Bahnen. In demselben Zeitabschnitt werden die gleichen Wassermengen in niederen Breiten erhitzt, in höheren abgekühlt; was an Kohlensäure bei dem einen Prozeß verloren geht, wird gleichzeitig bei dem anderen wieder zugeführt, die Gesamtmenge der atmosphärischen Kohlensäure wird dadurch in keiner Weise verändert.

Nun schiebt sich allerdings aus höheren Breiten, besonders aus dem Südpolargebiete, eine eiskalte Unterschicht gegen den Äquator hin vor. Allein ihre Wanderung ist äußerst langsam,

¹ Hier ist von Bedeutung, daß das Dichtigkeitsmaximum des Seewassers nicht bei 4° liegt, wie das des destillierten Wassers, sondern bei einer tieferen Temperatur eintritt; die Temperatur, bei der Seewasser sein Dichtigkeitsmaximum besitzt, sinkt mit steigendem Salzgehalt. Bei einem Salzgehalt von 35 ‰, der im allgemeinen als Mittelwert gilt, wird die maximale Dichtigkeit nach KNUDSEN erst bei — 3,524° erreicht.

nirgends tritt sie in höheren Breiten mit ihrer ursprünglichen Temperatur, bezw. mit ihrem anfänglichen Salz- und Gasgehalt an die Meeresoberfläche. Wir dürfen daher ihren Einfluß auf das Gesamtklima als sehr geringfügig anschlagen. Schließlich wird aber dieses Wasser im Polargebiet durch wärmeres und salzreicheres Wasser ersetzt, was eventuell an Gasen in niederen Breiten abgegeben wird, wird gleichzeitig in höheren Breiten aufgenommen.

Ich vermag den Grundgedanken der CHAMBERLIN-SALISBURY-schen Hypothese nicht als richtig anzuerkennen. Sie spricht aus, daß in der einen Periode warme, in der anderen kalte Meeresströme von größerer Bedeutung waren und daß ihnen entsprechend sich der Gasgehalt der Atmosphäre änderte. Allein stets mußten sich warme und kalte Ströme kompensieren und dadurch konnte die Zusammensetzung der Atmosphäre keine Veränderung im ganzen erleiden. Deswegen möchte ich glauben, daß die Glazialfrage auch durch die von CHAMBERLIN und SALISBURY vorgeschlagene Kombination morphologischer und allgemein tellurischer Faktoren noch nicht ihre Lösung gefunden hat.

c) Kosmische Ursachen.

Wir gelangen also zu dem Schlusse, daß die auf der gesamten Erde wahrnehmbaren Klimaänderungen der Vorwelt nicht auf lokalmorphologischer Basis zu erklären sind, daß aber auch allgemein tellurische Ursachen nicht als ausreichend angesehen werden können. Dadurch sind wir aber in die Notwendigkeit versetzt, kosmische Faktoren zur Erklärung heranzuziehen.

Hier sind wiederum zwei Gruppen von Hypothesen denkbar: die eine knüpft an die Stellung der Erde im Planetensystem, besonders ihre Lage zur Sonne an, die andere faßt Vorgänge auf der Sonne selbst ins Auge.

Es ist bekannt, daß die Elemente der Erdbewegung gewissen periodischen Veränderungen unterworfen sind, durch die sich Lage und Richtung der Erdachse und der Abstand von der Sonne ändern. Diese Änderungen, deren Ausmaß und Periodizität ziemlich genau festgestellt sind, dienten früher vielfach zur Erklärung der quartären Eiszeit. Jetzt hat man diesen Weg fast überall verlassen und vernachlässigt die klimatischen Effekte dieser kosmischen Faktoren nahezu vollständig. Es fragt sich aber, ob damit nicht das Kind

mit dem Bade ausgeschüttet ist. Zwar kommen diese kosmischen Faktoren wohl nicht für die Eiszeiten in Betracht, schon weil diese unperiodische oder sehr langperiodische Ereignisse sind, die mit den relativ kurzperiodischen Schwankungen der Erdbahn etc. nicht in Verbindung gesetzt werden dürfen. Wohl aber ist es denkbar, daß kleinere und möglicherweise auch periodisch auftretende Klimaschwankungen mit den kosmischen Faktoren der ersten Gruppe in Zusammenhang stehen. Solche verhältnismäßig kurzperiodischen Klimaschwankungen liegen vielleicht in den Interglazialzeiten vor; auf ähnliche Vorgänge läßt sich vielleicht auch teilweise die Schichtung der Sedimentgesteine zurückführen, wie ich schon früher hervorgehoben habe.

Die Änderungen der Erdbewegung und ihre möglichen Rückwirkungen auf das Klima sind in der Literatur so oft und so gründlich besprochen worden, daß es überflüssig erscheint, hier noch einmal näher auf sie einzugehen. Es genügt völlig, das Tatsachenmaterial an der Hand eines guten Lehrbuches, z. B. von HANN'S Klimatologie¹, hier kurz zu registrieren.

A. Änderungen in der Schiefe der Ekliptik.

„Die Änderungen in der Schiefe der Ekliptik können nach LAPLACE im Maximum $1^{\circ} 22,5'$ zu beiden Seiten des Wertes von $23^{\circ} 28'$ betragen, die Schiefe der Ekliptik kann deshalb die extremen Werte von $22^{\circ} 6'$ und $24^{\circ} 50'$ erreichen. Einer Zunahme der Schiefe der Ekliptik entspricht eine Abnahme der Wärmesumme, die der Äquator erhält, und einer Zunahme der Wärme an den Polen; also eine größere Ausgleichung in der Wärmeverteilung auf der Erde. Das Umgekehrte gilt für eine Abnahme der Schiefe der Ekliptik. Die Länge dieser Perioden umfaßt rund 40000 Jahre vom Maximum zum Minimum.“ „Beim Minimum der Schiefe der Ekliptik ist das Winterhalbjahr in höheren Breiten etwas wärmer, das Sommerhalbjahr kälter, umgekehrt verhält es sich beim Maximum der Schiefe der Ekliptik.“

Nun ist ein milder Winter in höheren Breiten für eine Vereisung sicher nicht ungünstig, ein kühler Sommer aber zweifellos ihr sehr förderlich. Es wäre daher sehr wohl daran zu denken, die Glazialzeiten mit Minimis, Interglazialzeiten mit Maximis der Schiefe

¹ J. HANN, Handbuch der Klimatologie. 1. 3. Aufl. Stuttgart 1908.

der Exzentrizität in Verbindung zu bringen. Dem scheint jedoch die ungleiche Länge von Glazial- und Interglazialzeiten zu widersprechen.

Man wird aber trotzdem diesen Faktoren einen gewissen Einfluß auf das Klima und alle damit zusammenhängenden Erscheinungen, besonders auf die Verbreitung der Vegetation nicht absprechen dürfen. HANN macht mit Recht darauf aufmerksam, daß eine Steigerung der Sommertemperaturen, die nach EKHOLM im Maximum über der Ekliptikschiefe $2,4^\circ$ unter dem 70. Breitengrade beträgt, die Polargrenzen vieler Gewächse verschieben muß. Nun wissen wir aber, daß in einer Zeit, die etwa 7—10 000 Jahre zurückliegt, die meisten Bäume in Skandinavien weiter nach Norden verbreitet waren und höher an den Bergen hinaufgingen. In dieser Periode, genauer vor 9100 Jahren, erreicht aber die Schiefe der Ekliptik mit $24^\circ 24'$ nahezu ihren Maximalwert.

B. Änderungen in der Exzentrizität der Erdbahn und die Präzession der Äquinoktialpunkte.

Die Exzentrizität der Erdbahn kann zwischen 0,0777 und nahe Null schwanken. Bei zunehmender Exzentrizität steigt die Wärmemenge, welche die Erde von der Sonne erhält, jedoch bleibt diese Zunahme gering und beträgt bei einem Maximum der Exzentrizität nur 0,3 % der heute von der Sonne erhaltenen Wärmemenge. Stünde die Erdachse senkrecht auf der Ekliptik, so würden Änderungen der Exzentrizität nur äußerst geringfügige Folgen für das Erdklima haben.

Die Änderungen der Exzentrizität werden erst dadurch von klimatischer Bedeutung, daß sich mit ihnen zwei andere Erscheinungen verbinden: nämlich die Schiefe der Ekliptik, welche die Jahreszeiten hervorruft, und die Präzession der Tag- und Nachtgleichen.

Auf der einen Erdhälfte, auf der der Winter ins Aphel, der Sommer ins Perihel fällt, werden die Unterschiede der Jahreszeiten verstärkt, auf der anderen werden sie abgeschwächt. Würde der Frühlings- und Herbstpunkt stets die gleiche Lage auf der Erdbahn haben, so würden diese Unterschiede in der Ausgestaltung der Jahreszeiten auf beiden Hemisphären konstant bleiben. Da aber die Äquinoktien auf der Erdbahn wandern, so müssen kühlere und wärmere Winter und entsprechende Sommer innerhalb ge-

wisser Perioden auf beiden Hemisphären einander ablösen. Es wechseln aber nicht nur die Bestrahlungsverhältnisse auf beiden Halbkugeln, sondern auch die Längen der Jahreszeiten. Gleich sind diese nur dann, wenn die Äquinoktialpunkte mit Aphel und Perihel zusammenfallen, sonst sind sie stets von ungleicher Länge; die Differenzen sind dann am stärksten, wenn die Verbindungslinie der Äquinoktialpunkte auf der Apsidenlinie senkrecht steht. Die Erdhälfte, welche das Perihel im Winter passiert, hat einen kurzen und wärmeren Winter und einen langen und kühleren Sommer, bei der anderen Erdhälfte ist es natürlich umgekehrt. Diese Gegensätze treten dann am stärksten auf, wenn die Exzentrizität der Erdbahn ihr Maximum erreicht.

Auf dieser zweifellos einwandfreien Berechnung beruhen die Eiszeithypothesen von ADHÉMAR, CROLL und SCHMICK. Sie dürfen hier als bekannt vorausgesetzt werden, bezw. ich kann auf ihre mehr oder minder ausführliche Darstellung in den Lehrbüchern verweisen. Diese drei Forscher gelangen, teilweise unter Heranziehung tellurischer Momente, zu dem Ergebnis, daß Eiszeiten nur in die Perioden fallen können, in welchen die Exzentrizität der Erdbahn ein Maximum erreicht. Innerhalb dieser Perioden stärkster Exzentrizität sind wiederum nur die Zeitabschnitte einer Vereisung günstig, in denen dank der Lage der Äquinoktialpunkte die Jahreszeiten sehr ungleiche Länge besitzen. Auch dann kann naturgemäß niemals eine Vereisung gleichzeitig auf beiden Hemisphären auftreten, es bedeckt sich immer nur die mit Eis, welcher der lange Winter und der kurze Sommer zukommt. Die Eiszeiten alternieren also auf beiden Halbkugeln, und zwar in Perioden von ungefähr 10 000 Jahren.

Man muß gestehen, daß diese Eiszeithypothese auf den ersten Blick recht einleuchtend ist; es ist nicht wunderbar, daß CROLL, der sie durch tellurische Zutaten noch schmackhafter zu machen gewußt hat, seinerzeit viele Anhänger gefunden hat und einige wenige wohl auch heute noch besitzt. Man wird auch zugeben müssen, daß vom rein theoretischen Standpunkte aus sich nicht allzuviel gegen sie einwenden läßt, hingegen gelingt es, ebenso wie bei der Kohlensäurehypothese, nicht, die Tatsachen mit ihr in Einklang zu bringen.

Heute hat die Südhemisphäre den längeren Winter, sie müßte sich also im Zustande fortschreitender Vereisung befinden. Dies

ist bekanntlich nicht der Fall; auch im Südpolargebiete läßt sich in neuerer Zeit allenthalben ein Rückgang der Vereisung wahrnehmen. Wenn das Eis in der Antarktis heute noch sehr viel größere Ausdehnung besitzt als in der Arktis, so findet dies in der so verschiedenen Ausgestaltung der beiden Polargebiete genügende Erklärung. Riesige Massen von Inlandeis wurden während der quartären Eiszeit im Südpolargebiet produziert, ihr Abschmelzen wird aber durch das ozeanische Klima am Außenrande des antarktischen Kontinentes verzögert. Der heutige kältere und längere Winter ist wegen seiner heftigen Stürme, die eine Anhäufung des Schnees auf dem Inlandeise nicht gestatten, einer Vereisung eher ungünstig als günstig. In niederen Breiten ist aber auf der Südhemisphäre der Winter durchaus nicht rauher, meist sogar milder als auf der Nordhemisphäre. Die Unterschiede in der Sonnenbestrahlung und in der Länge der Jahreszeiten auf beiden Hemisphären werden, wie schon öfters betont worden ist, völlig von den morphologischen Verschiedenheiten maskiert.

Man darf mit einem gewissen Grade von Sicherheit annehmen, daß bei gleicher Ausgestaltung die beiden Polargebiete ungefähr gleich starke Vereisungen aufweisen würden. Ein langer und kalter Winter ist für die Anhäufung von Schnee durchaus nicht immer absolut günstig, jedenfalls nicht im kontinentalen Klima. Für die Erhaltung der im Winter gefallenen Schneemassen ist aber ein kühlerer Sommer, auch wenn er länger ist, günstiger als ein kurzer und heißer. Es scheint, als ob die Saisonunterschiede auf den beiden Hemisphären sich bis zu einem gewissen Grade kompensieren und daß ihr Einfluß auf die Ausdehnung der Eismassen sehr viel geringer ist, als man a priori annehmen sollte.

Noch mehr sprechen andere Momente gegen die Annahme der ADHÉMAR-CROLL'schen Hypothese. Unsere letzte Vereisung fällt nach neueren, ziemlich übereinstimmenden Schätzungen in eine Periode, in die sie nicht fallen dürfte, nämlich in eine Zeit mit ziemlich schwacher Exzentrizität. CROLL will daher die letzte Eiszeit um 80 000 Jahre, von heute gerechnet, zurückschieben; dieser Annahme widersprechen aber unsere so außerordentlich frischen Jungmoränen und jüngsten Diluvialterrassen, prähistorische Funde und vieles andere mehr.

Schon vielfach ist auf das Fehlen von Eiszeiten in älteren Perioden, so im Tertiär und im gesamten Mesozoicum, hingewiesen

worden; nach CROLL und ADHÉMAR müßten Vereisungen in regelmäßigen Abständen aufeinander folgen.

Dazu kommt noch ein anderes Moment von größter Bedeutung, auf das CHAMBERLIN¹ und SALISBURY neuerdings hinweisen. Es sind nämlich die Perioden, welche nach der ADHÉMAR-CROLL'schen Hypothese für die einzelnen Vereisungen zu Gebote stehen würden, viel zu kurz. Die gesamte Perihelperiode hat eine Länge von 21 000 Jahren, für die Vereisung einer Hemisphäre würden also 10 500 Jahre zur Verfügung stehen. Aber auch diese Zeit wird nicht in ihrer ganzen Länge in Betracht kommen, denn die Wirkungen der vorausgehenden günstigen Periode werden sich bis weit in die ungünstige hinein erstrecken.

CHAMBERLIN und SALISBURY vergleichen sehr hübsch die gesamte Perihelperiode mit einem Sonnenjahre. Der effektive Winter bzw. die Vereisungszeit nehmen in mittleren Breiten nur etwa $\frac{1}{4}$ der gesamten Periode ein, ihn begleiten Frühling und Herbst, d. h. Jahreszeiten, in denen sich günstige und ungünstige Einflüsse etwa die Wage halten. In der gesamten Perihelperiode würde also der „effektive Winter“, d. h. die Zeit, die allein für die Vereisung einer Hemisphäre zu Gebote steht, nur 5—6000 Jahre betragen. In dieser Zeit aber können die riesigen Eismassen der quartären Eiszeiten sich nicht angehäuft und über ungeheure Landstrecken verbreitet haben.

Um eine Strecke von 1000 englischen Meilen zurückzulegen, brauchte der Eisrand des nordamerikanischen Keewatin-Eisfeldes 14 000 Jahre, falls er sich mit der sicher recht beträchtlichen Geschwindigkeit von 1' pro Tag vorschob. Dabei ist nicht eingerechnet die sicher sehr lange Zeit von dem Jahre, in dem der erste Schnee dauernd liegen blieb, bis zu dem Jahre, in dem die Schneeanhäufung so beträchtlichen Umfang erreicht hatte, daß sie selbständige Bewegungen ausführen konnte. Ebenso wenig sind in Rechnung gesetzt die Oszillationen des Eisrandes, die man als zweifellos ansehen darf.

So spricht denn vielleicht mehr noch als alles andere die relative Kürze der ADHÉMAR-CROLL'schen Perioden gegen die Möglichkeit, sie zur Erklärung der Eiszeiten heranzuziehen. Gänzlich ohne Einfluß auf die Ausgestaltung des Klimas sind sie jedoch ebenfalls nicht, nur sind ihre Wirkungen so geringfügig, daß sie vielfach durch lokaltellurische Momente maskiert werden.

¹ Geology. 3. 428.

C. Änderungen in der Intensität der Sonnenstrahlung.

Die klimatischen Verhältnisse an der Erdoberfläche stehen sämtlich in direkter oder indirekter Abhängigkeit von der Sonnenwärme. Es liegt daher von vornherein der Gedanke nahe, die Klimaschwankungen mit Veränderungen der von der Sonne ausgesendeten Strahlung in Zusammenhang zu bringen. Diese Auffassung hat bis vor wenigen Jahrzehnten kaum irgendeinen Anhänger gehabt, sie ist aber jetzt, wie es scheint, in siegreichem Vordringen begriffen¹.

Wir wissen, daß die uns bekannten Fixsterne sehr verschiedene Temperaturen besitzen, oder mit anderen Worten, daß das Energie-maximum ihrer Strahlung an verschiedenen Orten des Spektrums sich befindet. Am niedrigsten ist die Temperatur der roten Sterne, am höchsten die der rein weißen, zwischen beiden Gattungen stehen die in gelbem Lichte strahlenden. Wir dürfen wohl als sicher ansehen, daß alle Fixsterne ursprünglich weißes Licht ausstrahlten, daß aber ein Teil von ihnen durch allmähliche Abkühlung zu gelben und roten Sternen geworden ist. Diesen wohl allen Fixsternen gemeinsamen Abkühlungsprozeß macht nun auch unsere Sonne durch; sie war früher ein weißer Stern, sendet jetzt in der Hauptsache gelbes Licht aus und wird später zum roten Stern werden. Der naheliegende Gedanke, daß sich die einzelnen Phasen dieses Abkühlungsprozesses in vörlweltlichen Klimaveränderungen auf der Erde widerspiegeln, ist in geistvoller Weise von DUBOIS² ausgeführt worden. Er nimmt dabei an, daß die Sonne seit dem Ende der Tertiärzeit zwischen den Stadien eines gelben und eines roten Sternes hin und her schwankt und erklärt auf diesem Wege die alternierenden Glazial- und Inter-glazialzeiten.

Gegen die Hypothese von DUBOIS sprechen besonders die vorquartären Vereisungen. DUBOIS glaubt allerdings, daß diese Vereisungen einen rein lokalen Charakter besaßen und sich auf morphologischer Grundlage erklären lassen. In einem der vorhergehenden Kapitel wurde dargetan, daß diese bisher herrschende

¹ Vergl. T. W. E. DAVID, Conditions of Climate etc. Congrès Geolog. Internat. Comptes rendus X. Session. Mexiko 1906. p. 480.

² E. DUBOIS, Die Klimate der geologischen Vergangenheit. Nijmegen 1893.

Auffassung der permischen Vereisung durch neuere Entdeckungen hinfällig geworden ist. Eismassen von riesiger Ausdehnung und, wie es scheint, teilweise in geringer Meereshöhe gelegen, die große Teile von Südafrika und dem Kongobecken bedeckten und selbst noch in Togo Spuren hinterlassen haben, lassen sich nur durch eine allgemeine Herabsetzung der Temperatur erklären.

Der Wechsel kühlerer und wärmerer Perioden im Quartär, das wiederholte Auftreten von Eiszeiten im Laufe der geologischen Zeiten läßt uns, falls die Sonnenwärme dabei eine Rolle spielt, langperiodische oder in manchen Fällen auch unperiodische Schwankungen der Sonnenausstrahlung um ein gewisses Mittel annehmen. Sicherlich werden sich diese Schwankungen sehr schwer erklären lassen, und es ist fraglich, ob wir überhaupt einmal zu ihrer einwandfreien Deutung gelangen werden. Dies könnte uns jedoch nicht abhalten, diese Schwankungen als etwas wirklich Vorhandenes anzusehen; denn es gibt recht viele Erscheinungen, deren Existenz wir nicht bezweifeln dürfen, deren letzte Ursachen wir aber nicht — oder noch nicht — zu erkennen vermögen.

Indem wir also die Deutung der solaren Temperaturschwankungen zunächst ganz aus dem Spiele lassen, dürfen wir uns die Frage vorlegen, ob uns irgendwelche Beobachtungen in heutiger Zeit überhaupt berechtigen, solche anzunehmen. Es versteht sich von selbst, daß derartige Beobachtungen und Messungen sich nur über sehr kurze Zeiträume erstrecken, was ihren Wert bis zu einem gewissen Grade einschränkt. Trotzdem glaube ich, daß sich die eben gestellte Frage selbst in dem engen Rahmen unserer Beobachtungen heute schon mit Ja beantworten läßt.

Es liegt nahe, zunächst die 11jährigen Sonnenfleckperioden zu unseren Betrachtungen heranzuziehen. Fragen wir uns zuerst, ob und in welcher Weise die Sonnenausstrahlung in sonnenfleckreichen und sonnenfleckarmen Perioden sich ändert. Diese Frage sucht SCHEINER¹ zu beantworten; er sagt: „Die Photosphäre sendet an der Stelle eines Sonnenflecks eine geringere optische Strahlung aus als an anderen Stellen. Jedenfalls muß in einem Sonnenfleck die Wärmeausstrahlung eher geringer als größer sein, gegenüber derjenigen der Photosphäre.“ Sonnenfleckmaxima würden daher eine Verminderung der Sonnenwärme herbeiführen, wenn

¹ SCHEINER, Populäre Astrophysik. Leipzig 1908. p. 455.

nicht möglicherweise die abkühlende Wirkung der Sonnenflecken durch andere Phänomene kompensiert würde, auf die SCHEINER ebenfalls aufmerksam macht. In der Nähe der Sonnenflecken pflegt die Photosphäre sehr reich mit Fackeln besetzt zu sein, die zweifellos die entgegengesetzte optische und thermische Wirkung besitzen wie die Sonnenflecken. Überhaupt ist es denkbar, daß in Sonnenfleckperioden die gesamte Photosphäre eine höhere oder auch vielleicht eine niedrigere Temperatur besitzt als in gewöhnlichen Zeiten. So kommt denn SCHEINER schließlich zu dem Resultat: „Es läßt sich a priori nicht übersehen, ob überhaupt eine Abhängigkeit der Sonnenstrahlung vom Fleckenstande existiert, und in welchem Sinne.“

Nach ARRHENIUS¹ ist es wahrscheinlich, daß sich in den Sonnenfleckperioden die Wärmestrahlung der Sonne erhöht, „denn die Sonnenflecke entsprechen einer ‚Umrührung‘ auf der Sonne, welche wohl eine Temperatursteigerung der strahlenden Oberflächengebiete, besonders der Fackeln herbeiführen muß.“

Mag man nun annehmen, daß die Sonnenflecken eine Erhöhung oder Herabsetzung der Sonnenwärme bedingen, immer wird man es als nahezu sicher anzusehen haben, daß in sonnenfleckreichen Jahren die Wärmeausstrahlung der Sonne nicht ganz den gleichen Wert besitzt, wie in sonnenfleckarmen. Änderungen der Sonnenwärme mit einer Periode von ca. 11 Jahren sind also in hohem Grade wahrscheinlich.

Freilich werden diese Unterschiede in der Sonnenausstrahlung keine sehr hohen Werte erreichen, sonst müßten sie sich an der Erdoberfläche überall deutlich bemerkbar machen. Dies ist jedoch bekanntlich nicht der Fall; es scheinen allerdings auch die meteorologischen Phänomene eine gewisse Periodizität aufzuweisen, die im Zusammenhang mit den Sonnenfleckperioden steht. Aber alle diese Erscheinungen auf meteorologischem Gebiete sind wenig handgreiflich und ergeben sich erst aus feinen und lange fortgesetzten Messungen.

In den Tropen fällt nach KÖPPEN² ein Maximum der Sonnenflecken mit einem Minimum der Mitteltemperatur zusammen, das allerdings nur 0,32° unter dem Normalen liegt; das Maximum der Temperatur eilt aber hier dem Fleckenminimum um $\frac{3}{4}$ Jahre

¹ ARRHENIUS, Kosmische Physik. p. 141.

² HANN, Handbuch der Klimatologie, 3. Aufl. 1908. 1. 356.

voraus. **NORDMANN** hat die Untersuchungen **KÖPPEN**'s in neuerer Zeit fortgesetzt und gelangt auf Grund der Jahresmittel von 13 tropischen Stationen zu dem Schlusse, daß durch die Sonnenflecken die mittlere Temperatur vermindert wird.

Es scheinen jedoch diese Beziehungen nur für die Tropen zu gelten und sich in den gemäßigten Zonen gelegentlich umzukehren, wie **RIZZO** an Turiner Beobachtungen zeigte. Nach anderen Forschungen scheinen die Wirkungen der Sonnenfleckperioden in den gemäßigten Zonen hauptsächlich darin zu bestehen, daß während der Maxima sich die Differenzen der absoluten Jahresextreme erhöhen, während sie in den Minimis sich verringern.

Hinsichtlich der möglichen Beziehungen zwischen Sonnenflecken und Treibeis, Zyklonen und Bewölkung sei auf die Literatur¹ verwiesen. Nur auf den merkwürdigen Parallelismus zwischen Sonnenflecken und phänologischen Erscheinungen, über den **ARRHENIUS** ausführliche Mitteilungen macht, sei hier noch hingewiesen. In sonnenfleckreichen Jahren scheinen, wenigstens in der gemäßigten Zone, die Gewächse früher zu blühen, auch bricht das Eis frühzeitig auf. Diese Erscheinungen lassen sich sehr wohl mit extrem heißen Sommern zusammenbringen, wie man sie für die Sonnenfleckmaxima anzunehmen geneigt ist.

Im allgemeinen lassen sich gewisse Beziehungen zwischen meteorologischen Phänomenen und Sonnenflecken nicht gut ableugnen; aber die Wirkungen der Sonnenfleckperioden auf der Erdoberfläche sind verhältnismäßig schwach und wenig einheitlich.

Sehr viel kräftiger und einheitlicher sind die Klimaschwankungen, auf die hingewiesen zu haben das große Verdienst von **BRÜCKNER**² ist. Einer Reihe von extrem nassen und kalten Jahren folgt in einem Abstände von ca. 35 Jahren eine Periode trockener und warmer Jahre. Diese Perioden spiegeln sich sehr deutlich in Regen-, Temperatur- und Luftdruckmessungen, in der Wasserhöhe von Seen und Flüssen, phänologischen Erscheinungen und Ernteergebnissen wieder, auch die Gletscher folgen mit ihren Vorstößen und Rückgängen im allgemeinen den **BRÜCKNER**'schen Perioden. Die 35jährigen Klimaschwankungen treten auf der gesamten Erde gleichzeitig und im allgemeinen auch in gleichem Sinne auf. „Dabei

¹ **ARRHENIUS**, Kosmische Physik. p. 141. — **HANN**, Klimatologie. p. 358.

² **BRÜCKNER**, Klimaschwankungen seit 1700. Wien 1890.

ist die Temperatur dasjenige Element, von dem alle übrigen mehr oder minder abhängen.“ Die Amplitude der Temperaturschwankungen beträgt im Mittel für die ganze Erde $0,76^{\circ}$. „Die Schwankungen sind für Mitteleuropa gleichbedeutend einem Hin- und Herpendeln der Isothermen um nicht weniger als 300 km oder 3 Breitengrade.“

So klar auch BRÜCKNER die vielfach ineinandergreifenden Wirkungen der 35jährigen Klimaperioden beobachten kann, ihre Ursachen kennt er nicht. Resigniert sagt er am Schlusse seines grundlegenden Werkes: „Nicht besser steht es um die Theorie der weit gewaltigeren und über viele Jahrtausende sich erstreckenden Klimaschwankungen, welche uns die Geologie in der Diluvialzeit kennen gelehrt hat. Sie sind ihrem Wesen nach durchaus den Klimaschwankungen von heute ähnlich; wir haben versucht, auf Grund dieser Ähnlichkeit den Schleier, der über den klimatischen Verhältnissen der Eiszeiten und der Interglazialzeiten liegt, etwas zu lüften. Allein auch hier sehen wir nur die Wirkung, während die Ursache uns verborgen ist. Das gleiche gilt von den in mehreren Jahrhunderten sich vollziehenden Klimaschwankungen mittlerer Dauer, die wir oben sowohl in der Diluvialzeit wie auch in der historischen Zeit mehr ahnten als kennen lernten.“

BRÜCKNER lehnt ausdrücklich einen Zusammenhang seiner Klimaschwankungen mit Sonnenfleckperioden ab, aus neueren Arbeiten scheint sich aber doch ein solcher zu ergeben. Man hat nämlich gefunden, daß sich die 11jährigen Perioden zu größeren Perioden von 33 bis 35 Jahren vereinigen lassen. Nach HANSKY zeigen die absoluten Maxima und Minima der Sonnenflecke eine Periode von 72 Jahren. Das kompetente Urteil von HANN (l. c. p. 363) lautet dahin: „Durch die neuerdings aufgestellte 33—35jährige Sonnenfleckperiode (große Periode rund 70 Jahre) scheint nun auch eine Ursache für die 35jährige BRÜCKNER'sche Periode gefunden zu sein.“

Wenn tatsächlich die BRÜCKNER'schen Klimaperioden durch die Sonnenflecken hervorgerufen werden, so liegt es sehr nahe, auch größere Klimaschwankungen auf das Konto einer wandelbaren Sonnenausstrahlung zu setzen.

Fragen wir uns, ob uns Beobachtungen an der Sonne berechtigen, erhebliche Schwankungen in der Strahlungsintensität anzunehmen.

Im Jahre 1904 wies LANGLEY¹ darauf hin, daß die Intensität der Sonnenstrahlung nicht ganz unbeträchtlichen Schwankungen unterliege, oder mit anderen Worten, daß die sogen. Solarkonstante keinen ganz gleichbleibenden Wert hätte. (Als Solarkonstante bezeichnet man die Wärmemenge, welche die Sonne der Erde an der äußeren Grenze der Atmosphäre bei senkrechtem Einfallen zustrahlt. Als Maß dienen kleine (Gramm-)Kalorien; d. h. als Einheit sieht man die Strahlungsintensität an, die, auf einer Fläche von 1 Quadratcentimeter bei senkrechtem Einfallen völlig absorbiert, die Temperatur eines Gramms Wasser im Laufe einer Minute um 1° erhöhen würde.) Nach LANGLEY wäre es nun denkbar, daß die Solarkonstante in ziemlich kurzen Zeiträumen innerhalb von 10 % schwanken könne; dadurch könnten Veränderungen der Temperaturen an der Erdoberfläche hervorgerufen werden, die 7,5 % nicht übersteigen, meistens aber erheblich darunter blieben, da die Zeiten mit stark abweichender Solarkonstante zu kurz seien, um das Erdklima sehr nachhaltig zu beeinflussen. Im Laufe der letzten Jahre haben ABBOT und FOWLE² die Untersuchungen LANGLEY's im großen Maßstabe weitergeführt und dabei seine Annahmen in allen wesentlichen Punkten bestätigt. Aus einer großen Reihe von Beobachtungen, die sie teils in Washington, teils auf dem Mt. Wilson in Kalifornien (1800 m Meereshöhe) ausführten, geht hervor, daß die Solarkonstante im Mittel 2,1 Kalorien beträgt, aber zwischen 1,89 und 2,22 Kalorien schwanken kann. Im allgemeinen waren die Perioden, in denen sich eine starke Abweichung vom Mittelwerte wahrnehmen ließ, kurz und unregelmäßig verteilt. Oft schwankte innerhalb von 10 Tagen die Solarkonstante um 5 % hin und zurück. Perioden mit sehr hoher Strahlungsintensität (2,20 Kalorien) waren niemals länger als zwei Monate. Neben diesen kurzen und unregelmäßigen Schwankungen ließ sich auf Mt. Wilson jedoch auch eine mehrmonatliche feststellen, deren Maximalwert 4 % betrug.

Man darf von vornherein erwarten, daß die kurzen und unregelmäßigen Schwankungen der Solarkonstante das Klima an der

¹ LANGLEY, On a possible variation of the solar radiation and its probable effect on terrestrial temperatures. *Astrophysical Journal*. 1904. 19. 305.

² *Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution*. 1, 2. Washington 1908.

Erdoberfläche nur wenig zu beeinflussen vermögen; dies zeigt auch ein Vergleich mit meteorologischen Daten. Auch wenn die Solar-konstante ein ganzes Jahr lang von ihrem Mittel abweichen würde, so würde sich die Veränderung der Strahlungsintensität nur in sehr abgeschwächtem Maße auf der Erdoberfläche bemerkbar machen. Von der Differenz, die an der Außenseite der Atmosphäre meßbar wäre, würde sich auf meteorologischen Stationen im Binnenlande nur $\frac{1}{4}$, an der Küste $\frac{1}{5}$, auf ozeanischen Inseln $\frac{1}{10}$ feststellen lassen. Würde die Solarkonstante ein ganzes Jahr lang eine Abweichung um 5 % aufweisen, so würden sich die Mitteltemperaturen im Binnenlande nur um 1°, auf ozeanischen Inseln sogar nur um 0,3° von ihrem normalen Werte entfernen.

Es ist aber von vornherein wahrscheinlich, daß die in den Jahren 1903 bis 1908 beobachteten Schwankungen der Solar-konstante nicht die größten sein werden, die überhaupt möglich sind, und ebenso, daß statt der kurzen auch lange Perioden vorkommen können. Wenn in einem Zeitraum von 5 Jahren Schwankungen der Strahlungsintensität von über 5 % vorkommen, darf man dann solche um 20 und 30 % für undenkbar halten? Und hindert uns irgend etwas daran, Zeiten von sehr langer Dauer anzunehmen, in denen die Solarkonstante weit von ihrem heutigen Werte abwich? Daß aber starke und langandauernde Veränderungen der Strahlungsintensität sehr wohl alle Klima-veränderungen erklären können, die uns aus der geologischen Vergangenheit überliefert worden sind, ist mir persönlich recht wahrscheinlich.

Man könnte hier einwenden, daß eine Temperaturherabsetzung allein noch nicht genügen könnte, um eine Vereisung hervorzurufen. Nehmen ja doch einzelne Geologen für den Eintritt der quartären Vereisung keine Verminderung der Temperatur, sondern lediglich Vermehrung der Niederschläge oder Veränderungen an der Erdoberfläche an.

Die Vereisung großer Landgebiete ist zu vergleichen mit einem riesigen Destillationsprozeß. In relativ warmen Meeren wird Wasserdampf produziert, der sich auf kälteren Festländern in Gestalt von Schnee niederschlägt. Sinken aber die Temperaturen an der Erdoberfläche überhaupt, so werden auch die Meere abgekühlt und geben weniger Wasserdampf ab. Jedoch werden

Meere und Kontinente nicht in dem gleichen Maßstabe kälter. Nach den Berechnungen von ZENKER werden in niederen Breiten die Kontinente viel stärker erhitzt als die Meere; unter dem Äquator hätte man im reinen Kontinentalklima eine Mitteltemperatur von $34,6^{\circ}$, im reinen Seeklima aber nur $26,1^{\circ}$. In höheren Breiten, oder, was dasselbe besagen will, bei abnehmenden Temperaturen kehrt sich aber dieses Verhältnis um. Unter 50° hat das Landklima nur noch $5,0$, das Seeklima aber $7,1^{\circ}$ Mitteltemperatur und unter dem 70 . Grad beträgt die Differenz bereits $13,8^{\circ}$ zugunsten des Seeklimas.

Es werden also, ganz abgesehen von warmen Strömungen, bei niederer Temperatur die wärmeren Meere noch ziemlich viel Wasserdampf abgeben können, der sich auf den kälteren Kontinentalmassen kondensieren kann. Wenn aber die Temperatur weiter sinkt, so wird die Differenz zwischen Land- und Seetemperaturen sich vergrößern und damit auch die Kondensationsmöglichkeit sich verstärken. Die absolute Luftfeuchtigkeit wird zwar bei sinkenden Temperaturen sich verringern, die relative aber wenigstens über den Kontinenten sich erhöhen. Die Kontinente werden aber überhaupt feuchter werden, und auch aus diesem Grunde wird die Luftfeuchtigkeit und Niederschlagsmenge sich steigern.

Daß diese theoretischen Deduktionen tatsächlich zutreffen, hat BRÜCKNER beweisen können; denn er hat gezeigt, daß eine Herabsetzung der Temperatur fast auf allen Kontinentalmassen eine Vermehrung der Niederschläge zur Folge hat.

Ohne Verminderung der Temperatur können sich die Niederschläge nur dann vermehren, wenn sehr starke morphologische Änderungen an der Erdoberfläche eintreten. Man müßte, um ein allgemeines Feuchterwerden zu erklären, notwendigerweise entweder eine starke Vergrößerung der Meeresoberfläche oder eine allgemeine Erhöhung der Festländer annehmen.

So ist es denn sehr wahrscheinlich; daß die Klimaschwankungen der geologischen Vergangenheit in erster Linie auf Änderungen der Mitteltemperaturen zurückzuführen sind, daß diese aber ihren hauptsächlichsten Grund in Variationen der Sonnenbestrahlung besitzen.

12. Zusammenfassung.

1. Über die Wirkungen, welche der Kohlensäuregehalt der Atmosphäre auf das Klima an der Erdoberfläche ausübt, gehen die Ansichten der Physiker noch so weit auseinander, daß eine gesicherte physikalische Grundlage der Kohlensäurehypothese zurzeit noch nicht zu bestehen scheint. Hier soll angenommen werden, daß ein wechselnder Gehalt an Kohlensäure in der Atmosphäre für das Klima eine gewisse Bedeutung haben mag, daß diese sich aber höchstens schätzen, nicht berechnen läßt.

2. Durch die Bildung von Kohlenflözen und Carbonaten wird der Atmosphäre andauernd Kohlensäure entzogen, ersetzt kann dieser Verlust im allgemeinen nur durch vulkanische Exhalationen werden. Da in der geologischen Vergangenheit Verbrauch und Zufuhr sich wohl nur zufällig ergänzt haben, wird der Kohlensäuregehalt der Atmosphäre innerhalb von vielleicht weiten Grenzen geschwankt haben. Wäre nun die atmosphärische Kohlensäure ein klimatischer Faktor erster Ordnung, so müßten Zeiten mit vorherrschendem Kohlensäureverbrauch und schwacher Vulkantätigkeit ein kühles, solche mit reicher Zuführung und entsprechend lebhaftem Vulkanismus ein warmes Klima besessen haben.

3. Aus den uns zugänglichen geologischen Daten läßt sich ein solcher Zusammenhang nicht beweisen. Für die untercambrische Vereisung, die in Südastralien und China nachgewiesen zu sein scheint, läßt sich nichts Bestimmtes aussagen, da die gleichalterigen Gesteine viel zu wenig bekannt sind. Die jungpaläozoische Vereisung, die FRECH ins Unterrotliegende setzt, fällt nicht mit einem Nachlassen, sondern einer Steigerung der Vulkantätigkeit zusammen. Hingegen wird das Erlöschen des Vulkanismus zur Zechsteinzeit von einem exzessiv heißen Wüstenklima begleitet. Zur Erklärung des warmen mesozoischen Klimas läßt sich keine Zunahme der vulkanischen Eruptionen heranziehen. Eine obercretaceische Eiszeit, die FRECH für wahrscheinlich hält, ist nicht nachzuweisen. Noch viel weniger verlaufen Vulkantätigkeit und Temperatursteigerung einander im Tertiär parallel. Der Vulkanismus besitzt je einen Höhepunkt im Untereocän und Miocän, die Tertiärfloren deuten aber auf eine ganz allmähliche und, wie es scheint, ununterbrochene Verschlechterung des Klimas vom Eocän

bis zum Pliocän hin. Ebenso entspricht der quartären Eiszeit nicht ein fast völliges Versagen der Vulkantätigkeit; diese war wahrscheinlich im Quartär lebhafter als heute, aber allerdings schwächer als im Jungtertiär.

4. Die permische Vereisung kann man weder durch eine Polverschiebung noch durch die Annahme besonders günstiger morphologischer Bedingungen erklären. Wenn in der Nähe des damaligen Äquators große Gebiete von Eis bedeckt waren, so läßt sich dies nur aus einer starken Temperaturherabsetzung auf der ganzen Erdoberfläche verstehen.

5. Von einem gleichmäßigen Klima in irgendeiner geologischen Periode kann man nicht sprechen. Klimazonen waren stets vorhanden, nur waren sie bei allgemein hohen Erdtemperaturen weniger scharf ausgeprägt als heute.

6. Die quartäre Eiszeit war nicht einheitlich, sondern bestand aus einer Anzahl von Kälteperioden, die durch wärmere voneinander getrennt wurden. Die „interglazialen“ Faunen und Floren Nordeuropas, soweit sie auf ein milderes Klima deuten, konnten nicht unmittelbar am Rande einer ausgedehnten Inlandeismasse existieren; es ist vielmehr wahrscheinlich, daß sich das Eis in jenen Zeiten ebensoweit oder vielleicht noch weiter zurückgezogen hatte als heute.

Daß die Glazialfauna mit Mammut und wollhaarigem Rhinoceros nicht südlich von den Alpen und Pyrenäen und in Fennoskandia gefunden worden sind, deutet nach FRECH auf eine ununterbrochene Eisbedeckung Nordeuropas und der europäischen Hochgebirge hin. Es ist aber sehr wohl denkbar, daß die Glazialfauna zwar die Hochgebirge überschreiten konnte, Südeuropa aber deswegen nicht besiedelte, weil ihr das dortige Klima nicht zusagte. Ebenso kann man sich vorstellen, daß Interglazialablagerungen mit Mammutresten ursprünglich in Fennoskandia vorhanden waren, durch eine nachfolgende Vereisung aber zerstört wurden. Man muß aber auch mit der Möglichkeit rechnen, daß Fennoskandia während langer Zeiten eisfrei war, aber aus irgendwelchen Gründen nicht von der Glazialfauna besiedelt wurde, ebensowenig wie Mammut und wollhaariges Rhinoceros in der Postglazialzeit weit nach Norden vordrangen.

7. Zwischen Permocarbon und Quartärtertiär bestehen merkwürdige Analogien. In beiden Perioden beobachtet man starke

Gebirgsbildung und heftige Vulkantätigkeit, Temperaturniedrigung und Bildung von Kohlenflözen. Zwischen diesen vier Phänomenen scheinen kausale Zusammenhänge vorhanden zu sein, der Anstoß ging aber vielleicht von der Klimaverschlechterung aus.

8. Die „geologischen Klimate“ sind nicht auf morphologischer Grundlage, auch nicht durch eine Verlegung der Erdpole zu erklären, weil anscheinend die wesentlichen Klimaschwankungen allgemeine Verbreitung besaßen und die ganze Erde in gleichem Sinne betrafen.

9. Von allgemeinen tellurischen Ursachen der Klimaschwankungen können nur Veränderungen der irdischen Atmosphäre in Betracht kommen. Ein stärkerer Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre würde die Temperaturen an der Erdoberfläche steigern; jedoch kann sich der Wasserdampf der Atmosphäre nicht erhöhen, wenn nicht zuvor durch andere Vorgänge eine Temperatursteigerung hervorgerufen worden ist. Eine solche Erhöhung der Temperaturen wird möglicherweise durch eine Verstärkung des Kohlensäuregehaltes in der Atmosphäre hervorgerufen werden können. Doch werden auf diesem Wege nur unperiodische oder sehr langperiodische Klimaschwankungen ihre Erklärung finden können. Die BRÜCKNERschen Klimaperioden und die Interglazialzeiten sind nicht auf Schwankungen im Prozentgehalt der atmosphärischen Kohlensäure zurückzuführen. Ebenso wenig ist die von CHAMBERLIN und SALISBURY verfochtene Hypothese haltbar, nach der die Weltmeere zu manchen Zeiten vorwiegend Kohlensäure an die Atmosphäre abgegeben, zu anderen hauptsächlich aus ihr absorbiert hätten.

10. Man wird zu der Auffassung gedrängt, daß kosmische Faktoren bei der Ausgestaltung der geologischen Klimate eine mehr oder minder bedeutsame Rolle gespielt haben.

Änderungen in der Schiefe der Ekliptik genügen wohl nicht, um eine Eiszeit hervorzurufen, müssen aber doch für das Klima, besonders auch für die Verbreitung der Vegetation, von gewisser Bedeutung sein. Das gleiche gilt für die Änderungen in der Exzentrizität der Erdbahn und die Präzession der Äquinoktialpunkte, bezw. die durch sie hervorgerufene ungleiche Länge der Jahreszeiten auf beiden Hemisphären.

Hingegen spielen Veränderungen in der Intensität der Sonnenstrahlung möglicherweise eine höchst bedeutsame Rolle. Allerdings wird man kaum mit DUBOIS annehmen dürfen, daß sich im

Laufe der geologischen Perioden die Sonne aus einem weißen zu einem gelben, bezw. roten Sterne entwickelte; dem widersprechen u. a. die paläozoischen Eiszeiten. Vielmehr wird man wohl Schwankungen der Sonnenstrahlung um ein gewisses Mittel anzunehmen haben. Solche sind in neuester Zeit durch die Untersuchungen von LANGLEY, ABBOT und FOWLE nachgewiesen worden. Bisher wurden allerdings nur kurzperiodische Schwankungen festgestellt, wie sich übrigens bei der Kürze der Beobachtungszeit nicht anders erwarten läßt. Diese geben uns aber das Recht, auch langperiodische Schwankungen für möglich zu halten, die für die Ausgestaltung des irdischen Klimas unbedingt von Bedeutung sein müssen.

Bestärkt wird diese Auffassung durch neuere Forschungen, aus denen sich ein Zusammenhang zwischen den BRÜCKNER'schen Klimaschwankungen und Sonnenfleckperioden zu ergeben scheint.

Bei der Erörterung einiger physikalischen Fragen hatte ich mich der Unterstützung und des Rates von Herrn Geheimrat Prof. Dr. WINKELMANN zu erfreuen. Herr Prof. Dr. KNOPF stellte mir bereitwilligst einige astrophysikalische Werke zur Verfügung. Beiden Herren spreche ich hiermit meinen herzlichsten und aufrichtigsten Dank aus.