

Das paläoklimatische Problem.

Von Dr. Fritz Kerner v. Marilaun.

Hält man unter den in den letzten Jahren versuchten Erklärungen der geologischen Klimate Umschau, so begegnet man veränderten Neuauflagen der ältesten paläothermalen Hypothesen. Im Jahre 1907 zog Spitaler neuerdings Änderungen in der Stellung der Erdachse als Ursache von Eiszeiten in Betracht, ein Jahr später entwickelte Nölke eine Hypothese, welche sich an die sehr alte Vorstellung von den kälteren und weniger kalten Aetherräumen, die unser Sonnensystem durchziehen soll, anschließt. Als Sommerfeld im Vorjahre das Empordringen heißer Quellen als Ursache früherer milder Polarklimate ansprach, griff er in veränderter Form auf die älteste Anschauung zurück, nach welcher die Klimate der Vorzeit von der inneren Erdwärme beeinflusst waren. Auch Philippi beschrift im selben Jahre einen schon lange vor ihm betretenen Weg, als er Schwankungen in der Intensität der Sonnenstrahlung für die großen Klimawechsel verantwortlich machte. Und auch die Kohlensäurehypothese, welche zwar nicht so neuen Datums ist, aber von Frech neuerdings verteidigt wurde, zeigt, indem sie eine Verminderung der Wärmeausstrahlung als des Rätsels Lösung ansieht, einen Vergleichspunkt mit der sehr alten Annahme einer um den Erdball gelagert gewesenen Dunsthülle.

Erinnert man sich, daß im Laufe des verflrossenen Jahrhunderts wiederholt kosmische, solare, tellurische und atmosphärische Ursachen der großen Klimaänderungen in Betracht gezogen wurden, so wäre man fast versucht, den Entwicklungsgang der paläoklimatischen Forschung mit dem Gange eines Schöpfrades zu vergleichen, bei welchem stets wieder dieselben Schaufeln, nur mit verändertem Inhalte, emportauchen und wieder untertauchen. Während in den anderen Zweigen der Erdkunde ein wenn auch durch Stillstände und Rückfälle zuweilen unterbrochenes Emporsteigen erkennbar ist, bewegt man sich in der Paläoklimatologie wie im Kreise herum. Es drängt sich da wohl der Gedanke auf, daß entweder die Methode

der Forschung fehlerhaft sei, oder daß unser Erfahrungsschatz zur Lösung noch nicht ausreicht. Eine nähere Betrachtung lehrt, daß in der Tat beides der Fall ist.

Vor allem wird in der Paläoklimatologie das Hauptergebnis der vergleichenden Klimaforschung nicht in richtiger Weise verwertet. Dieses Ergebnis ist die Feststellung, daß die dem Solarklima entsprechende Wärmeverteilung auf der Erdoberfläche durch die Konfiguration der Meere und Festländer sehr modifiziert wird. Die richtige Verwertung dieses Resultates für die Paläoklimatologie besteht darin, zunächst die aus einer abweichenden Verteilung von Land und Meer sich ergebende Klimaänderung zu bestimmen und erst zur Erklärung der dann etwa noch verbleibenden klimatischen Differenz gegen die Jetztzeit hypothetische Hilfsfaktoren heranzuziehen. Dieser allein richtige Gedanke ist bereits für die Untersuchungen Heers leitend gewesen, dann wieder von Semper klar ausgesprochen worden; seinem allgemeinen Siege stellen sich aber drei Umstände hindernd in den Weg.

Zunächst die geographische Klimahypothese, welche von der Ansicht ausgeht, es müßten sich alle Klimarätsel der Vorzeit durch geographische Veränderungen allein erklären lassen. Sie wirkt, indem sie des Guten zu viel tun will, auf dieses Gute manchmal mehr nachteilig als fördernd ein. Als vor einigen Jahren der kühne Versuch gemacht wurde, auch das dunkelste der paläothermalen Probleme, die permokarbene Eiszeit auf rein geographischem Wege zu lösen, konnte dies nach Koken's eigenem Zugeständnisse nur durch mehrere superlative Voraussetzungen gelingen. Da man aber, wenn man etwas unwahrscheinlich Dünkendes glaubhaft machen will, höchstens mittlere Verhältnisse voraussetzen darf, schien jene Lösung nicht befriedigend. Wenn es nun Koken nicht wahrscheinlich machen konnte, daß im Permokarbon in der Gegend des heutigen Indiens beim jetzigen Solarklima große Gletscher bis an das Meeresniveau reichten, so wäre es — statt gleich wieder an hypothetische Hilfsfaktoren zu denken — das einzig Richtige gewesen, nachzuforschen, ein wie weites Hinabreichen der Gletscher nur durch veränderte geographische Verhältnisse seine Erklärung fände.

Ein zweites Hemmnis für die Anerkennung des Semper'schen Standpunktes sind die Ergebnisse des Studiums der

jüngsten geologischen Vergangenheit. Wir sehen da eine allgemeine negative Abweichung von den heutigen Temperaturverhältnissen bei einer mit der jetzigen in allen Hauptzügen übereinstimmenden Festlandsverteilung. Der Umstand, daß die Größe dieser Abweichung zonale Unterschiede aufweist und daß sie sich anscheinend mehrmals wiederholt hat, spricht wohl für Aenderungen des solaren Klimas. Man darf aber nicht vergessen, daß es sich hier nur um den einzigen besonderen Fall handelt, in welchem die Abweichung vom jetzigen Klima — wie es scheint — vorzugsweise auf Rechnung einer Aenderung des Solarklimas gesetzt werden darf, daß es aber ganz unzulässig wäre, den Schluß zu ziehen, daß, weil in der Diluvialzeit eine große Klimaabweichung von der Gegenwart ohne auffällige Verschiedenheit der Land- und Wasserverteilung vorhanden war, die Konfiguration der Erdoberfläche bei der Erklärung der geologischen Klimate überhaupt nur von nebensächlicher Bedeutung sei.

Man darf aber auch bei dem Problem der diluvialen Eiszeit das geographische Moment nicht unterschätzen. Mäßige Aenderungen der Seehöhe und Meeresnähe könnten in manchen Gebieten eine aus allgemeinen Ursachen eintretende Vereisung steigern oder schwächen und Schwankungen in der Richtung und Stärke von Meeresströmen könnten für einzelne Gebiete auch eine rein geographische Erklärung eines mehrmaligen Wechsels von Glazial- und Interglazialzeiten abgeben.

Ein drittes Hindernis für das Obsiegen des erwähnten Standpunktes liegt in dem Hauptergebnisse der geologischen Forschung betreffs des Klimas der früheren Perioden. Die Verbreitungsart der Meeres- und Landtiere und Landpflanzen weist auf eine gleichmäßige terrestrische Wärmeverteilung in vor-kretazischen Zeiten hin. Eine solche bedeutet nicht viel weniger als den Wegfall jeglichen Einflusses der Land- und Wasserverteilung auf das thermische Klima. Denn worin sollte sich dieser Einfluß wohl geäußert haben, wenn nicht in einem starken winterlichen Kälteüberschusse der Kontinente gegenüber den Meeren in höheren Breiten und in einem sommerlichen Wärmeüberschusse der Festländer gegenüber den Meeren in niedrigen Breiten, zweien Erscheinungen, die noch in den mittleren jährlichen Verhältnissen in entsprechender Weise zum Ausdruck kommen. Es kann sich aber auch bei all dem,

was die Faunen und Floren des älteren Mesozoikums und des Paläozoikums in betreff der früheren terrestrischen Wärmeverteilung lehren, doch nur um eine Unterdrückung oder Verschleierung des klimatischen Einflusses der geographischen Breite und der Land- und Wasserverteilung handeln; und in der Feststellung der Ursachen dieser Verschleierung ist die Lösung des Problems des früheren thermisch einheitlichen Klimas zu suchen. Diesen allein richtigen Standpunkt hat schon Neumayr vertreten. Man darf betreffs der früheren Perioden nicht von der gleichmäßigen Wärmeverteilung als etwas Gegebenem ausgehen und nach ihrer Erklärung streben; man muß vorerst jene Wärmeverteilung feststellen, welche bei der angenommenen Konfiguration der Erdoberfläche unter dem heutigen Solarklima herrschen würde und dann die Differenzen zwischen der so festgestellten Verteilung und der auf paläontologischem Wege erschlossenen gleichmäßigen Wärmeverteilung zu ergründen suchen.

Aus dem vorigen erhellt, daß es auch ganz unzutreffend ist, wenn manchmal Aenderungen der Festlandsverteilung neben solchen der Sonnenwärme, der Wärmeausstrahlung, der Ekliptik, der Exzentrizität der Erdbahn usw., als eine der möglichen Ursachen der großen Klimawechsel genannt werden. Aenderungen der Land- und Wasserverteilung müssen — da solche ja in bedeutendem Ausmaße stattfanden — in jedem Falle die Ursachen von großen Klimawechseln gewesen sein; es fragt sich nur, in wie weit noch Aenderungen anderer Klimafaktoren bei diesen Wechseln mit im Spiele waren.

Der Einfluß der Land- und Wasserverteilung auf die terrestrische Temperaturverteilung kommt in seinen allgemeinsten Zügen in der Forbeschen Formel zum Ausdrucke. Sie stellt die mittlere Jahrestemperatur eines Parallels als Funktion seines Winkelabstandes vom Aequator und seiner prozentualen Landbedeckung dar. Sie gibt besonders in der ihr von Spitaler gegebenen Form die beobachteten Werte recht befriedigend wieder, eignet sich aber nicht zur Extrapolation von Verhältnissen, für welche die Beobachtungen fehlen.

In letzterer Zeit hat Spitaler eine neue Formel aufgestellt, welche es gestattet, außer der mittleren Jahrestemperatur auch die Monatstemperaturen der Parallelkreise, und

zwar für verschiedene Werte der Ekliptik zu berechnen. Auch von dieser Formel, welche eine wertvolle Bereicherung der analytischen Meteorologie darstellt, gilt das betreffs der Forbes'schen Formel Gesagte. Beide Gleichungen sind nicht allgemein gültig, da sie in dreifacher Hinsicht auf unzutreffenden Voraussetzungen beruhen.

Zunächst ist es nicht richtig, die Temperatur auf einem Punkte eines Parallels als Funktion der Bedeckungsart des ganzen Parallelkreises zu betrachten. Ueber großen Meeresflächen ändert sich die Temperatur vom Rande gegen das Innere zu nur wenig. (Ausgenommen die Fälle thermisch stark abweichender randlicher Strömungen.) Die Temperatur über der Mitte eines weiten Meeres erscheint so nur von der auf einem Bogenstücke des Erdumfanges vorhandenen Bedeckungsart abhängig. Ueber den zentralen Teilen des tropischen Pazific herrschen schon dieselben Temperaturen, welche sich auf einem ganz mit Wasser bedeckten Tropengürtel fänden. Wenn nun bei der jetzigen geringen Landbedeckung des Aequators viele Punkte desselben schon jene Temperatur aufweisen, welche sie auf einem Wasseräquator hätten, so muß die Temperatur eines solchen der jetzigen mittleren Aequatorwärme schon sehr nahe liegen. Nach den Formeln von Forbes und Spitaler erscheint jedoch die jetzige Aequatorwärme als die einer Landbedeckung von 20% entsprechende und ergibt sich für die Temperatur des Gleichers auf einer wasserbedeckten Holosphäre ein um 4° zu niedriger Wert.

Zweitens ist es nicht korrekt, den Einfluß des Landes auf die mittlere Temperatur eines Parallels der Erstreckung des Landes proportional zu setzen, da Land nach innen zu immer heißer oder kälter wird. Man müßte, worauf schon Precht hinwies, die Variablen der Forbes'schen Formel mit einem unechten Bruche als Exponenten versehen. Eine Landbedeckung von 33% würde auf die Mittelwärme eines Parallels einen verschiedenen Einfluß haben, je nachdem sie einem einzigen Kontinent entspräche oder die Summe der relativen Längserstreckung zahlreicher Inseln wäre. Die Forbes'sche Gleichung ergibt für beide Fälle dieselbe Temperatur.

Drittens ist es ganz unzulässig, anzunehmen, daß die Temperatur eines Parallels nur von der auf ihm selbst vorhandenen (beziehungsweise von der mit Zuziehung der

Nachbarparallele ausgeglichenen) Landverteilung abhängen und daß sich die entgegengesetzten Wirkungen der kühlen und warmen Meeresströmungen stets ausgleichen müßten. Auf einem ganz mit Wasser bedeckten 50. Parallel könnten sehr verschiedene Temperaturen herrschen, je nachdem die Tropenzone landbedeckt wäre, was jegliche Zufuhr von warmem Ozeanwasser ausschliesse, oder sich zwischen den Wendekreisen nur mehrere schmale, meridional verlaufende Kontinente befänden, was eine starke Warmwasserheizung der mittleren Breiten mit sich brächte. Die Gleichungen von Forbes und Spitaler ergeben für einen wasserbedeckten 50. Breitengrad stets dieselbe Temperatur.

Die Verwertbarkeit der Forbes'schen Formel für paläoklimatologische Zwecke ist sonach eine beschränkte. Sie vermag die aus einer geänderten Land- und Wasserverteilung resultierende thermische Abweichung vom heutigen Klima nur in ihren rohesten Umrissen zu entschleiern. Ich habe die Formel vor Jahren auf Neumayrs Rekonstruktion der jurassischen Festländer und auf Frechs Rekonstruktionen des Silurs und Devons angewendet und so zu den ersten primitiven Vorstellungen über die Bedeutung der Land- und Wasserverteilung in der Paläoklimatologie verholfen.

Eine für paläoklimatologische Zwecke brauchbare Analyse der Beziehungen zwischen Wärme- und Festlandsverteilung muß die Mitteltemperatur der Parallele als Funktion der Land- und Wasserverteilung in ganzen Erdgürteln darstellen. Um die Temperaturverhältnisse innerhalb einer Polarkalotte genau beurteilen zu können, muß man die Land- und Wasserverteilung auf der ganzen übrigen Erdoberfläche mit in Betracht ziehen.

Die klimatischen Bedingungen einer Polarkappe sind auf Grund nachstehender Erwägung zu entwickeln. Der Pol erhält zufolge der jährlichen Aenderung der Erdachsenstellung gegen die Sonne vier Zehntel der vom Gleicher empfangenen Strahlung und erscheint so zunächst auch einer bedeutenden Erwärmung fähig. Während aber die Besonnung am Aequator ziemlich gleichmäßig über das Jahr verteilt ist, steht am Pole einer Jahreszeit ununterbrochener Einstrahlung eine Jahreszeit gänzlichen Mangels von Besonnung gegenüber. Zur Zeit der Polarnacht droht intensivste Erkaltung; sie kann nur durch

ein Mittel verhindert werden, das jedoch nur bei stärkster Einwirkung diesen Effekt hervorbringt, bei schwächerem Inkrafttreten aber die entgegengesetzte Wirkung ausübt: die Zufuhr warmen Wassers aus den Tropen. Ist diese Zufuhr sehr stark, so kann sie die Eisbildung im Winter hemmen und es bleibt die sommerliche Insolation ganz zur Erwärmung des Polargebietes verfügbar. Ist die Warmwasserzufuhr nicht sehr kräftig, so kommt es im Winter zur Eisbildung und dann zu starker Erkaltung und es bleibt nun auch der Sommer kühl, da die Insolation zur Eisschmelze verbraucht wird.

Für den Bestand eines milden Polarklimas ist somit (beim heutigen Solarklima) zunächst eine vorwiegende Wasserbedeckung der Polarkappe eine notwendige Vorbedingung. Ist die Polarkappe ganz oder größtenteils landbedeckt, so kommt es in jedem Falle zu intensiver winterlicher Erkaltung. Der Bestand eines milden Polarklimas ist zugleich aber auch an eine teilweise Meeresbedeckung der gemäßigten Zone gebunden. Ist die gemäßigte Zone ganz landbedeckt, so wird in einer landbedeckten Polarkappe ein überaus kalter Winter mit einem sehr warmen Sommer verbunden sein, in einer wasserbedeckten Polarkalotte dagegen ein sehr kalter Winter und ein kühler Sommer herrschen (analog den jetzigen Verhältnissen auf der pazifischen Seite des arktischen Gebietes). Ist die gemäßigte Zone (oder wenigstens der subpolare Gürtel) ganz wasserbedeckt, so wird in der Polarregion gleichfalls ein sehr kalter Winter mit einem sehr kühlen Sommer verbunden sein, da sich dann die eventuell aus den Tropen kommende Warmwasserzufuhr im uferlosen Ozeane zu sehr verliert, als daß sie noch eine erwärmende Wirkung in hohen Breiten ausüben könnte. In einer landbedeckten Polarkappe wird dann eine nach innen zu abnehmende Gletschereisbedeckung auftreten (analog den jetzigen Verhältnissen in der Antarktis), in einer wasserbedeckten Polarkappe eine sehr bedeutende Anhäufung von Meereis zustande kommen.

Das Maß, in welchem aber bei teilweiser Meeresbedeckung der gemäßigten Zone das Polarklima durch Warmwasserzufuhr gemildert werden kann, hängt wieder von der Land- und Wasserverteilung in den Tropen ab. Ist das Tropengebiet ganz landbedeckt, so kann gar kein hocharwärmtes Wasser in die mittleren Breiten und von diesen in höhere

Breiten dringen. Das Ausmaß, in welchem bei vorwiegender Meeresbedeckung der Tropen den mittleren und höheren Breiten einer Hemisphäre hocharwärmtes Wasser zugeführt wird, ist aber wieder von der Verschiedenheit der Land- und Wasserbedeckung in den außertropischen Teilen beider Hemisphären abhängig. Die diesbezüglich jetzt bestehenden Unterschiede bringen es mit sich, daß der Südostpassat den Nordostpassat an Stärke und Stetigkeit übertrifft und viel warmes Wasser aus der südlichen in die nördliche Hemisphäre hinübergetrieben wird und zur Verstärkung der Strömungen in derselben beiträgt.

Auch die Mitteltemperatur eines Parallelkreises innerhalb der gemäßigten Zone ist durch die Verteilung der Meere und Festländer in der benachbarten Polarregion und Tropenzone mitbedingt, wogegen die *Mittelwärme* eines tropischen Parallelkreises von den in den Polargebieten herrschenden Verhältnissen ziemlich unabhängig sein muß. Formeln, welche die Mitteltemperaturen der Breitenkreise als Funktion der Land- und Wasserverteilung in den verschiedenen Erdgürteln zur Darstellung brächten, wären aber für paläoklimatische Untersuchungen noch ganz unzureichend. Man müßte Formeln haben, welche die Temperatur eines beliebigen Punktes eines Parallels in ihrer Abhängigkeit von der Verteilung der Festländer und Meere zeigen würden.

Nach den jetzigen Verhältnissen möchte es wohl scheinen, daß große Temperaturunterschiede auf demselben Parallel nur in höheren Breiten vorkommen können. Der Umstand, daß heute auf der Nordhalbkugel zwar eine starke Aussackung der Winter- und Jahresisothermen gegen den Pol hin, aber nur zwei flache Vorwölbungen derselben gegen den Aequator zu vorhanden sind, könnte aber doch mit der jetzigen Konfiguration dieser Halbkugel im besonderen Zusammenhange stehen. Es trifft sich nämlich jetzt, daß die größte Wärmequelle für die hohen Breiten und die größte Kältequelle für die niedrigen Breiten gerade auf einander stoßen. Man sieht, wie der Golfstrom, da er der stärkere ist, den Labradorstrom vollständig niederringt, aber selbst aus diesem schweren Ringen geschwächt hervorgeht. Würde der Labradorstrom einen Verlauf nehmen, auf welchem er mit dem Golfstrom nicht zusammenträte, und auch mit keinem anderen warmen Starkstrome in

Berührung käme, so brächte er wohl bis in die Nähe der Tropen tiefe Temperaturen. Nun könnte es wohl möglich sein, daß auch breitere Wasserwege als die Davisstraße zum Abtransport von Eisbergen, aber nur in geringem Maße zur Aufnahme lauer Triften zur Verfügung ständen.

Philippi hat gegen die von Koken versuchte Heranziehung kalter Meeresströme zur Erklärung der permischen Eiszeit eingewendet, daß solche Ströme auf einem benachbarten Lande die Feuchtigkeit mindern und so eine Vergletscherung nicht fördern könnten. Man wird aber die beiden Hauptbedingungen einer Vereisung bis zu einem gewissen Grade getrennt betrachten dürfen. Als Kältequelle für niedrige Breiten kann in erster Linie doch nur ein echter Polarstrom, welcher direkt in den rücklaufenden Bogen eines subtropischen Stromkreises eintritt, in Betracht kommen. Man müßte annehmen, daß die andere der zwei Hauptbedingungen, die Luftfeuchtigkeit, auf anderem Wege herbeigebracht würde. Auch Weikof, dessen Anschauungen hier höchste Beachtung verdienen, führte als ursächliche Momente einer Vergletscherung Brasiliens an, „mehr vergletscherte Länder in höheren südlichen Breiten, also eine größere Stärke der kalten Strömungen von dort mit viel mehr Eisbergen beladen als jetzt, oder aber im ganzen keine intensivere, aber so gerichtete Strömung, daß die größte Masse kalten Wassers und Eis gerade Brasilien traf und natürlich, daß die jetzige warme brasilianische Strömung einen anderen Lauf hätte“.

Ich möchte noch auf eine zweite Kältequelle für niedrige Breiten hinweisen, auf das kalte Auftriebwasser. Da dasselbe ein Ersatz für durch Winde weggeführtes Oberflächenwasser ist, könnte unter Bedingungen, welche eine Verstärkung der tropischen Luftströmungen nach sich zögen, auch die Temperatur erniedrigende Wirkung des kalten Küstenwassers wohl merklich größer werden als sie heute ist. Kaltes Auftriebwasser als ein ursächliches Moment für kühle Tropenklimate in Betracht zu ziehen, erscheint mir als durchaus passendes Gegenstück zu Sommerfelds Vorschlag, aufsteigende Thermalwässer als Ursache milder Polarklimate anzusehen. Der manchmal ausgesprochenen Ansicht, daß bei der Entwicklung von nahe bis an das Meer reichenden Gletschern in einem tropischen Gebiete fast gar keine Teile der Erdoberfläche einer

Vereisung entgehen könnten, möchte ich nicht beipflichten. Ich glaube, daß alle jene Erdräume eisfrei bleiben würden, in welchen Kälte und Feuchtigkeit nicht in gleich hohem Maße wie in jenem Gebiete kombiniert wären, so vor allem feuchte insulare Tropengebiete, welche vor der Invasion kalter Ströme völlig geschützt wären, ferner heiße kontinentale Tropenregionen, und das Innere und die Ostküsten großer außertropischer Kontinente, wo bei viel größerer Kälte als in dem vergletscherten Teile der Tropen die Trockenheit der Entwicklung von Gletschern hinderlich wäre.

Natürlich müßte eine tropische Vergletscherung beim gegenwärtigen Solarklima nach Analogie der jetzt bei relativ hohen Temperaturen bestehenden Gletscherbildungen in den mittleren Südbreiten beurteilt werden. Die höchste Jahresisotherme, bis zu welcher am Westabhange der Südinsel von Neuseeland die Gletscher hinabreichen, ist $+10^{\circ}$. Das Sommermaximum ist dort 15° . Die niedrigsten beobachteten Oberflächentemperaturen in der Nähe des Aequators sind 15° zwischen Kap Warschek und Kap Guardafui (Kapitän Hoffmann) und 15.5° bei Callao (Humboldt). Erstere Temperatur (kaltes Küstenwasser) entwickelt sich innerhalb einer gegen kalte Oberflächenströme allseits völlig geschützten Meeresregion. Was letztere Temperatur betrifft, so kann man annehmen, daß sie bedeutend tiefer sein müßte, wenn im Süden vergletscherte Kontinente derart angeordnet wären, daß der Perustrom das mit Eisbergen beladene kalte Wasser eines starken Polarstromes von der Art des Labradorstromes zum Weitertransport übernehmen könnte. Es könnten also wohl noch nahe dem Aequator in Meereshöhe Temperaturen auftreten, welche so tief oder tiefer wären, als die höchsten Wärmegrade, bei welchen jetzt noch Gletscher vorkommen. Wo i k o f faßte das Ergebnis einer von ihm auf physikalischer Grundlage angestellten rechnerischen Betrachtung in die Worte zusammen: „Jedenfalls aber ist ersichtlich, daß auch unter dem Aequator Verhältnisse denkbar sind und wahrscheinlich existiert haben, welche Gletscher möglich machen.“ (Gletscher und Eiszeiten, S. 17.) Eine tropische Vergletscherung nach Analogie der polaren Vereisungen mit einem großen Teil des Jahres hindurch tief unter dem Gefrierpunkt liegenden Temperaturen wäre dagegen beim heutigen Solarklima undenkbar.

Das hier Vorgebrachte war nicht als eine Erwägung über die permokarbone Eiszeit gedacht. Lösungsversuche dieses Problems erschienen gerade jetzt, bevor die Geologenwelt zu der von Philippi hier versuchten völligen Verschiebung des Ausgangspunktes der Betrachtung Stellung genommen hat, ganz unzeitgemäß. Ich wollte nur dartun, daß eine Analyse aller beim jetzigen Solarklima möglichen Temperaturverteilungen auch mit der Möglichkeit großer Temperaturunterschiede innerhalb der Tropen zu rechnen hätte, daß die jetzige hohe und gleichmäßige Temperatur des Tropengürtels zwar den gewöhnlichen, aber nicht den einzigen dort möglichen Zustand darstelle. Auch die hohe mittlere Luftfeuchtigkeit ist wohl keine notwendige und nur eine in dem jetzigen vorwiegend ozeanischen Charakter der Aequatorialzone begründete Erscheinung. Schon jetzt gibt es — abgesehen von dem regenarmen Gebiete im äquatorialen Pazifik — unter verschiedenen geographischen Bedingungen Trockengebiete nahe dem Gleicher, an Westküsten (Küste von Nord-Peru), an Ostküsten (Somaliküste) und im Innern (Ceara) von Kontinenten. Der große Regenreichtum Amazoniens ist leicht verständlich, Zentralafrika ist, obwohl es östliche Randgebirge hat, allerdings auch regenreich, aber im Innern solcher Ungetüme von tropischen Festländern, wie sie für die älteren Formationen gezeichnet werden, könnten sich westwärts von meridional streichenden Ketten doch wohl auch trockene Kontinentalklimate entwickeln. Es wären, um auf die Temperaturverhältnisse zurückzukommen, für die paläoklimatische Forschung Formeln nötig, welche nicht bloß die mittleren Parallelkreistemperaturen, sondern auch die Wärmegrade auf den Schnittpunkten eines Parallels mit den verschiedenen Meridianen als Funktion seiner geographischen Breite und der Land- und Wasserverteilung darstellen würden.

Formeln, welche die Temperaturen auf der Erdoberfläche (im Meeresniveau) als Funktion der geographischen Breite und Länge darstellen, sind von Schösch (1856) und in letzter Zeit (1909) von Fritsche entwickelt worden. Erstere betreffen nur die mittlere Jahrestemperatur, letztere auch die Monatstemperaturen. Diese Formeln sind komplizierte analytische Ausdrücke der jetzt bestehenden thermischen Verhältnisse. Die Land- und Wasserverteilung ist in ihnen nicht

in Betracht gezogen und für paläoklimatologische Zwecke lassen sich dieselben nicht verwerten. Dann existieren noch die Formeln von Maadsen (1897), welche auch die Seehöhe berücksichtigen und auch einen „thermo-geographischen“ Quotienten enthalten. Dieser ist aber aus klimatischen Werten der Jetztzeit abgeleitet, so daß auch Maadsens Formeln zu einer Verwendung in der Paläoklimatologie nicht geeignet scheinen.

Es wäre wohl überhaupt kaum möglich, die Jahres- und extremen Monatstemperaturen beliebiger Punkte eines Parallels als Funktion der geographischen Breite und der Festlandsverteilung in den verschiedenen Erdgürteln durch ein einheitliches System von Gleichungen auszudrücken. Wohl aber kann und muß man es versuchen, dieses Problem für einzelne einfachere Fälle zu lösen. Ich habe im Vorjahre den ersten derartigen Versuch gemacht und Formeln aufgestellt, welche die mittlere Januartemperatur in jedem zehnten Meridian auf 75° , 80° und 85° Nordbreite als Funktion der Land- und Wasserverteilung in 70° N darstellen (Verhandlungen der k. k. Geologischen Reichsanstalt 1910, Septemberheft). Sie beruhen auf einer Analyse der starken, gegen den Pol hin gerichteten Aussackung, welche die Winterisothermen über der breiten Unterbrechung des subarktischen Festlandringes zwischen Grönland und Norwegen zeigen. Diese Formeln ziehen somit erst eine der drei Relationen, von welchen die Temperaturen in der Arktis abhängig sind, die Festlandsverteilung in der nördlich gemäßigten Zone in Betracht. Auf die Gruppierung von Land und Meer in den Tropen und in den gemäßigten Südbreiten nehmen meine Formeln noch nicht Bezug. Sie sind darum nur für jene Phasen der Erdgeschichte anwendbar, für welche diese letzteren Relationen als annähernd bekannt, bzw. als den heutigen ähnlich betrachtet werden dürfen, das ist für die verschiedenen Abschnitte der Tertiärzeit. Ich habe meine Formeln zunächst auf zwei neue Rekonstruktionen des Mitteleozäns, auf jene von Matthew (1906) und Kosmat (1908) angewendet. Auf ersterer erscheint — entgegen der gebräuchlichen Annahme — der Nordatlantik schon in seinen heutigen Umrissen, ist eine weite offene Verbindung zwischen dem indischen Ozeane und dem Arktik eingezeichnet und die Behringstraße gegen heute sehr verbreitert. Die An-

wendung meiner Formeln auf diese Rekonstruktion versprach so einen Aufschluß darüber, inwieweit die Annahme von Wallace und Woëikof zutreffe, daß das milde arktische Klima der Tertiärzeit durch Warmwasserheizung von drei Ozeanen her bedingt gewesen sei.

Zur Abschätzung des thermischen Einflusses des westsibirischen Stromes habe ich zuvor noch eine Formel aufgestellt, welche jene Wärmeeinwirkung zu beurteilen gestattet, die der Golfstrom ohne Abkühlung durch den Labradorstrom ausüben würde. Der westsibirische Strom konnte nämlich keine dieser letzteren Abkühlung analoge Temperaturverminderung erlitten haben, da das links von ihm zurückgeflossene Wasser ja das in die Barentssee eingedrungene laue Wasser der Golftrift war. Für die Golftrift selbst wurde aber zunächst keine größere Wärmewirkung als die heutige supponiert. Bei der Annahme, daß im Eozän der Labradorstrom den Golfstrom nicht durch Eisberge abkühlte, wäre ja schon ein mildes arktisches Klima vorausgesetzt worden und es sollte ja erst untersucht werden, inwieweit durch die kombinierte thermische Wirkung zweier auf derselben Seite der Polarkalotte einströmender starker Triften eine Steigerung der arktischen Wintertemperaturen gegenüber den heutigen (durch eine solche Trift bedingten) veranlaßt worden wäre. Dann wurde allerdings unter der Annahme einer Landverbindung zwischen Labrador und Grönland auch der thermische Einfluß untersucht, welchen zwei Triften von der Wärmewirkung einer nicht durch Eisberge abgekühlten Golftrift gehabt hätten.

Das charakteristische Merkmal der berechneten Temperaturverteilung ist eine Konzentration der Wärmesteigerung auf einen relativ kleinen Teil der Polarregion. Während ich für Spitzbergen Erhöhungen der Januar-temperatur um 5° bis 10° erhielt, ergab sich für Grinnelland kaum eine Abweichung von den heutigen thermischen Verhältnissen. Selbst unter der erwähnten Voraussetzung einer nicht abgekühlten Golftrift und unter der Annahme von mehr gegen Grönland zu gerichteten Triftströmungen, bekam ich für Grinnelland noch immer eine Januar-temperatur von -31° (jetzt -38°). Auch bei der Wallace'schen Annahme einer kräftigen breiten Kuro-Siwo-Trift liefern meine Formeln für den inneren Teil der Polarregion noch Wintertemperaturen tief unter -3° , die eine weitaus-

gedehnte Eisbildung bedingt und hiedurch zugleich die Entwicklung warmer Sommer auch für die äußeren Teile des arktischen Gebietes gehemmt hätten.

Semper hat bekanntlich die Möglichkeit erwogen, daß das Nordpolarmeer der Tertiärzeit so eingengt war, daß sich die hohen Sommertemperaturen eines arktischen Kontinentalklimas entwickeln konnten. Indem er aber hiemit die Annahme sehr tiefer Wintertemperaturen verbinden mußte, sah er sich gezwungen, für die arktischen Tertiärfloren die biologischen Verhältnisse der heutigen Pflanzenwelt Sibiriens und Canadas vorauszusetzen, die Fähigkeit, bei hoher Sommerwärme sehr große Winterkälte zu überdauern. Ich kann hier nicht zu dieser Frage Stellung nehmen, soviel ist aber sicher, daß für die Erklärung der arktischen Floren des Mesozoikums und Paläozoikums der von Semper entwickelte Gesichtspunkt nicht verwertbar ist, sofern man Analogieschlüsse auf das Wärmebedürfnis fossiler Organismen nicht absolut verwirft, womit die Paläoklimatologie — abgesehen von der Eiszeitforschung — überhaupt gegenstandslos würde. Die Frage nach dem beim heutigen Solarklima bestmöglichen ozeanischen Polarklima bleibt darum nach wie vor von größter Wichtigkeit.

Mittels meiner Formeln läßt sich diese Frage — ganz abgesehen davon, daß sie nur die Wintertemperatur betreffen und auf die Festlandsverteilung in den Tropen und in den mittleren Südbreiten keine Rücksicht nehmen — noch nicht genügend beantworten. Zunächst ist es noch ungewiß, inwieweit bei zunehmender Breite einer Verbindung des Weltozeans mit dem Polarmeere noch eine Steigerung der Wärmezufuhr eintreten würde. Bei einer sehr breiten Verbindung wäre die thermische Wirkung einer Trift wieder gering, weil sich das warme Wasser zu sehr verteilen würde. Bei der Untersuchung des arktischen Klimas der Eozänzeit trat diese Frage nicht in den Vordergrund, da auf Matthews Karte des Mitteleozäns der nordatlantische Ozean in seinen heutigen Umrissen erscheint und die westsibirische Meeresstraße schmaler als jener Ozean ist. Auf den Rekonstruktionen für die mesozoischen und paläozoischen Zeitabschnitte finden sich aber auch Kommunikationen des Weltozeans mit dem Polarmeere, welche die jetzige Lücke zwischen Grönland und Norwegen um das Eineinhalbfache bis Zweifache an Breite übertreffen. Es wären

wohl keine einwandfreien Extrapolationen, wenn man für solche auch eine $1\frac{1}{2}$ bis 2mal so große Wärmezufuhr annehmen wollte.

Es wäre möglich, daß meine Formeln den thermischen Effekt einer mehrfachen Warmwasserheizung des Polargebietes zu gering darstellen. Sie kranken vielleicht an demselben Uebelstande, welcher der Forbeschen Gleichung anhaftet, daß sie, auch wenn man sie auf von den heutigen abweichende Verhältnisse anwendet, doch noch die Zustände der Gegenwart widerspiegeln. Der Umstand, daß nach jenen Formeln selbst unter der Annahme, daß drei oder vier laue Triften von der Wärmewirkung der Golftrift den Polarkreis überschreiten würden, sich im Zirkumpolargebiete noch eine Kälteinsel mit Wintertemperaturen unter -20° mit Zähigkeit erhält, ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß der erwärmende Einfluß des heutigen Golfstromes in 85° nur mehr sehr gering ist. Es muß so mit Rücksicht auf die Ableitungsart der Formeln auch die kombinierte Wirkung einer Mehrheit solcher Ströme in Polnähe noch gering ausfallen. Auch die Annahmen, auf Grund deren ich zu dem Resultate kam, daß der Golfstrom ohne Abkühlung durch den Labradorstrom mit vier Drittel seiner jetzigen Wärme den Polarkreis überschreiten würde, waren vielleicht zu wenig günstige. Da ich nicht darauf ausging, einen Beweis dafür zu erzwingen, daß die geographische Klimahypothese zur Erklärung des milden arktischen Tertiärklimas ausreichend sei, lag für mich kein Anlaß vor, extrem günstige Voraussetzungen zu machen. Vielleicht könnte aber obiger Faktor zu $\frac{3}{2}$ oder gar zu $\frac{5}{3}$ geschätzt werden. Für die Annahme einer den thermischen Effekt des jetzigen Golfstromes um das Zwei- bis Dreifache übersteigenden Wärmewirkung der eozänen Meeresströme schiene aber doch kein ausreichender Grund vorhanden. Wenn Woeikof (Gletscher- und Eiszeiten . . .) davon sprach, daß der Golfstrom durch den Labradorstrom „sehr stark“ abgekühlt werde, so dürfte er wohl noch nicht an eine Wärmereduktion bis auf die Hälfte gedacht haben. Wenn Woeikof kurz darauf von den „jetzt bestehenden, relativ unbedeutenden warmen Strömungen“ sprach, so hatte er wohl auch die derzeit in der Subarktis herrschenden Verhältnisse im Auge, denn der durch den Labradorstrom und Ostgrönlandstrom noch nicht

abgekühlte und geschwächte Golfstrom, der vereinigte Florida- und Antillenstrom, stellt wohl nicht bloß für die Jetztzeit, sondern überhaupt einen besonders günstigen Fall von Stromstärkeentwicklung dar. Bei manchen der für frühere Perioden angenommenen Verteilungen von Land und Meer hätte sich vielleicht gar kein so kräftiger Strom entwickeln können.

Was den Einfluß der Konfiguration des Tropengebietes auf das arktische Klima betrifft, so kann derselbe früher im allgemeinen wohl kein sehr günstiger gewesen sein. Der in vielen Rekonstruktionen wiederkehrende tropische Kontinent, der sich von Brasilien über Afrika bis nach Australien erstreckt haben soll, hätte es ja bedingt, daß in mehr als der Hälfte des Erdumfanges gar kein hoch erwärmtes tropisches Ozeanwasser zum Transporte in hohe Breiten vorhanden gewesen wäre. Der Pazifik hätte aber wohl auch nicht in einem seiner Breite entsprechenden Ausmaße warmes Wasser geliefert, da ja auch heute der Warmwassertransport durch den Kuro-Siwo zu dem des Golfstromes durchaus nicht im Verhältnisse der Oberfläche des tropischen Pazifik zu jener des tropischen Atlantik steht. Es wäre so wohl möglich, daß die klimatische Begünstigung, welche dem Nordpolargebiete in früheren Zeiten infolge der breiteren Verbindungen mit dem Weltmeere zuteil wurde, dadurch, daß weniger hochoerwärmtes Ozeanwasser zum Transporte in hohe Breiten zur Verfügung stand, wettgemacht wurde.

Wie es sich bei vorwiegender Landbedeckung der inner-tropischen Zone (und größerer Meeresbedeckung der Roßbreiten) mit der tropischen Luftzirkulation verhalten hätte, ist schwer auszudenken. Man müßte wissen, wie sich in einem sehr langgestreckten tropischen Kontinente die Niederschläge gestalten würden. Es gibt wohl auch jetzt regenarme Gebiete nahe dem Äquator, dieselben sind aber keineswegs die vom Meere entfernteren Teile der Kontinente; es sind schmale Küstenstreifen (Küste von Nordperu und Somaliland) oder sogar rein ozeanische Gebiete (Pazifik um Malden Eiland). Die durch orographische Verhältnisse allerdings mehrfach modifizierte Abnahme der Regenmenge mit zunehmender Entfernung vom Meere, welche sich in mittleren und subarktischen Breiten zeigt und es mir ermöglichte, für diese Breiten Formeln aufzustellen, welche die Regenhöhe als Funktion der prozentischen Meeres-

bedeckung darstellen (Meteorologische Zeitschrift 1910, Juliheft) ist zwischen den Wendekreisen nicht vorhanden. Nun sind aber sehr weitgehende Extrapolationen nie statthaft und wenn sich jetzt im äquatorialen Südamerika und in Zentralafrika noch keine Abnahme gegen das Innere zu zeigt, so ist das noch kein Beweis dafür, daß es sich in einem Kontinente von fünf- bis sechsmal so großer Längserstreckung ebenso verhielte. Es wäre, zumal wenn der Kontinent auch eine bedeutende Breitenausdehnung besäße, wohl möglich, daß in seinem mittleren und westlichen Teile (westwärts meridionaler Ketten) große Trockenheit aufträte.

Auf einem solchen Kontinente wäre die Temperatur höher als jetzt am Aequator, die Wärmeabnahme mit der Höhe aber rascher als über den tropischen Ozeanen. Es rückt aber doch jetzt im Nordsommer das Gebiet niedrigsten Luftdruckes im Meeresniveau (zwischen 45° N und 45° S) vom äquatorialen Indik auf das südliche Eurasien hinüber. Es ist so schwer, zu sagen, inwieweit beim Bestande eines Kontinentes wie Gondwanaland, die Passate schwächer oder stärker wären als jetzt. Die Schwierigkeit, über das exzessive kontinentale Tropenklima, speziell über die Luftdruckverhältnisse in einem solchen, sich begründete Vorstellungen zu machen, wird offenkundig, wenn man bedenkt, wie schwer es wäre, aus den jetzigen vorwiegend ozeanischen Verhältnissen in den mittleren Südbreiten das subarktische Kontinentalklima, wie es jetzt in Nordeurasien herrscht, deduktiv zu entwickeln. Da nun das Klima der Tropenzone wegen deren Einheit und Größe auch die außertropischen Klimate sehr beeinflußt, so müssen bezüglich jener Perioden, für welche eine große Landentwicklung in niedrigen Breiten vermutet wird, auch Schlussfolgerungen über die außertropischen Klimate höchst problematisch bleiben.

Nach dem vorigen möchte es wohl scheinen, als wenn für eine rein geographische Erklärung der früheren milden arktischen Klimate die Dinge doch nicht so günstig stünden, als Wallace vermutete. Nun sind in letzter Zeit aber auch Reste antarktischer tertiärer und mesozoischer Floren aufgefunden worden. Hiedurch wird es allerdings schwierig, für das Tertiär und für die mesozoischen Polarklimate ohne hypothetische Hilfsfaktoren auszukommen. Die für das euro-

päische Nordmeer und die Barentssee erhaltenen relativ hohen eozänen Wintertemperaturen ergaben sich unter der bei Matthews Rekonstruktion zulässigen Annahme, daß auch im Eozän große Mengen warmen Wassers aus den südlichen Tropen in die nördlichen hinüber getrieben wurden, da ja meine Formeln aus den heutigen Verhältnissen abgeleitet sind und die Golftriftwärme jetzt zum Teile südhemisphärischen Ursprunges ist.

Wenn nun eine ausreichende Warmwasserheizung des arktischen Gebietes nur durch vereinigt Zuströmen des ganzen verfügbaren nordtropischen und eines Teiles des süd tropischen Ozeanwassers möglich war, so war eine gleichzeitige Heizung des antarktischen Gebietes mit dem übrigen süd tropischen Ozeanwasser wohl unmöglich. Das Auskunftsmittel der zeitlichen Verschiedenheit der Floren dürfte hier auch kaum ausreichen. Wohl unterliegt es keinem Zweifel, daß sich im Laufe eines jeden einzelnen der als „Periode“ bezeichneten langen Zeiträume die Land- und Wasserverteilung oftmals in wesentlichen Zügen geändert hat, so daß für jede Periode eine große Zahl verschiedener Karten gezeichnet werden müßte (womit ja schon begonnen wurde); dafür, daß sich im Laufe des Tertiärs aber so durchgreifende Änderungen des Erdantlitzes vollzogen hätten, daß einmal eine Massenwanderung warmen Tropenwassers gegen den Nordpol hin, und einmal gegen den Südpol zu erfolgt wäre, liegt kein Anhaltspunkt vor.

Wenn es nun schon gelänge, nicht nur für das Nordpolargebiet, sondern für die ganze Erdoberfläche die Temperaturen eines beliebigen Punktes als Funktion der geographischen Breite und der in verschiedenen Erdgürteln vorhandenen Festlandsverteilung darzustellen, wären die paläothermalen Probleme noch nicht ihrer Lösung zuführbar, da die paläogeographischen Rekonstruktionen noch zu unsicher sind. Unterschiede im Küstenverlaufe, welche noch weit innerhalb der Fehlergrenzen jener Rekonstruktionen liegen, können auf das Klima bestimmter Gebiete schon von größtem Einflusse sein. Allerdings würden morphologische Details, zum Beispiel die Floridastraße, auch einer analytischen Darstellung unüberwindbare Schwierigkeiten bieten. Daß die paläogeographischen Rekonstruktionen noch zu unsicher sind, um selbst paläothermale Kar-

dinalfragen zu beantworten, zeigt sich gerade in betreff der Eozänzeit. Der Unterschied zwischen den Wintertemperaturen, welche die klimatisch günstigsten und ungünstigsten Rekonstruktionen des Miozäns für den Eisfjord in Spitzbergen ergeben, beträgt etwa 21° . Die Wintertemperaturen, welche man unter Zugrundelegung der klimatisch ungünstigsten Rekonstruktion, welche hier zugleich die gebräuchliche ist (nordatlantische und asiatisch-amerikanische Landbrücke) unter Beziehung von hypothetischen Hilfsfaktoren erhält, bleiben hinter den jetzigen noch um einige Grade zurück.

Es ist so ganz aussichtslos, betreffs der Ursachen des milden arktischen Klimas der älteren Tertiärzeit zu bestimmten Vorstellungen zu gelangen, so lange die Paläogeographen die Frage: war im Eozän eine nordatlantische Landbrücke vorhanden, nicht mit einem dezidierten Ja oder Nein beantworten können. Wenn die Kohlensäurehypothese glaubt, zur Erklärung der europäischen und arktischen Tertiärklimate wirksam beizutragen, so geht sie — da ihr Hauptvertreter unter den Geologen die Wichtigkeit der Rücksichtnahme auf die geographischen Verhältnisse selbst betont — wohl unbewußt von der heutigen Festlandsverteilung aus. In den Meridianen Westeuropas kann man die Temperatur im Nordwinter jetzt am Aequator zu 26° , in 40° Breite zu 10° und in 80° Nordbreite zu -16° annehmen. Schlägt man zu diesen Werten für den Aequator 0° (in den Tropen soll ja nach Frech die von Arrhenius berechnete Temperaturerhöhung um 7° unterdrückt bleiben), für 40° Breite 8° und für 80° Breite 10° hinzu, so erhält man 26° , 18° und -6° , eine winterliche Temperaturverteilung, welche der für das Tertiär gewünschten ungefähr entspricht. Nimmt man auf die Land- und Wasserverteilung Rücksicht, so ergibt sich für das Eozän nach Semp er für Südwesteuropa eine Wintertemperatur von 21° , nach meinen Formeln — unter der gebräuchlichen Annahme einer nordatlantischen Landbrücke — für die Nordküste Spitzbergens -28° . Schlägt man zu diesen Werten die vorigen hypothetischen hinzu, so erhält man 26° , 29° und -18° , also eine von der vorigen wesentlich abweichende und unerwünschte zonale winterliche Temperaturverteilung.

Wenn man die paläothermalen Probleme ohne vorherige Feststellung der durch die abweichende Festlandsverteilung

bedingten Temperaturänderung mit Hilfe bestimmter, zonal verschiedener Aenderungen des Solarklimas lösen will, so ist das so, wie wenn man ein Bauwerk mit Türmen und Trakten von bestimmten Höhendimensionen aufführen wollte und hiebei auf die Niveauverhältnisse des abgesteckten Grundes keinerlei Rücksicht nähme. Gleichwie es da geschehen könnte, daß, wenn der Baugrund ein zerklüfteter Berggipfel wäre, ein hoher Turm in eine tiefe Scharte zu stehen käme und ein niedriger Verbindungstrakt über einen hohen Felszacken hinüberzöge, kann es sich auch im ersteren Falle ereignen, daß da, wo man eine Temperatursteigerung zu erzielen glaubt, in Wirklichkeit eine Wärmeabnahme resultiert und da, wo man nur eine mäßige Wärmezunahme möchte, eine große Temperaturerhöhung eintritt.

Letzterer Umstand kann sich in so unerwünschtem Maße geltend machen, daß hiedurch die Zulässigkeit der Heranziehung von Hilfsfaktoren in Frage gestellt erscheint. Für Grinnelland ergeben sich nach meinen Formeln sowohl bei Annahme einer nordatlantischen Landbrücke als auch nach Matthews Eozänbild noch Wintertemperaturen unter -35° , bei günstigsten Annahmen -31° , für den Eisfjord in Spitzbergen hingegen nach Matthews Rekonstruktion -5.5° . Wenn man nun unter der Voraussetzung, daß die tertiäre Flora von Grinnelland keine tieferen Wintertemperaturen als -10° ertrug, eine hypothetische Temperatursteigerung um 21° annimmt, so bekommt man für den Eisfjord eine Wintertemperatur von $+15.5^{\circ}$, also sehr viel mehr, als nach dem Charakter der dortigen Tertiärflora erwünscht ist. Unter der Annahme einer nordatlantischen Landbrücke erhält man dagegen für den Eisfjord eine Januartemperatur von -26° und nach Herbeiziehung hypothetischer Hilfsfaktoren im vorigen Ausmaße als mittlere Wintertemperatur -5° , was dem Florencharakter ungefähr entspräche und einen nur wenig mildereren Winter als den für Grinnelland supponierten bedeuten würde. Unter der von Semper in Erwägung gezogenen Annahme, daß sich die arktischen Tertiärfloren der jetzigen subarktischen Pflanzenwelt analog verhielten, hätte dagegen ein großer winterlicher Temperaturunterschied zwischen Grinnelland und Mittelspitzbergen nichts Unverständliches an sich. Sobald während der Winternacht eine vollständige Unterbrechung der Vegetations-

tätigkeit eintrat, konnte die Temperatur wohl sehr verschieden tief hinabgehen. Spitzbergen hätte wegen der Nähe des Beckens, in welches sich die westsibirische Strömung ergoß, auch bei vorwiegender Landbedeckung der Polarregion einen weniger kalten Winter als Grinnelland gehabt.

Nun wäre es aber möglich, daß sich auch für zwei Fundstätten vortertiärer Floren, für welche sich die von S e m p e r ins Auge gefaßte Möglichkeit ausschlosse, aus der angenommenen Wasser- und Landverteilung sehr verschiedene Wintertemperaturen ergeben würden und nicht — wie in betreff des Eozäns — noch eine andere Rekonstruktion in Betracht käme, aus welcher man geringe winterliche Temperaturunterschiede ableiten könnte. Wie wäre da die Ungereimtheit zu beheben, daß, wenn man hypothetische Hilfsfaktoren in solchem Ausmaße heranzieht, daß der eine Fundort eine seiner fossilen Flora entsprechend milde Wintertemperatur erhält, der andere eine viel höhere Wintertemperatur bekäme, als seiner Flora entsprechen würde. Die Annahme von Polverschiebungen könnte da in manchen Fällen über den Widerspruch hinweghelfen, in anderen vermöchte sie ihn auch nicht zu beseitigen, in noch anderen Fällen würde sie ihn hingegen noch vergrößern. In solchen Fällen bliebe dann (wenn man die Hypothese von großen partiellen Krustenwanderungen ausschaltet) nichts anderes mehr übrig als anzunehmen, daß die paläogeographische Rekonstruktion falsch ist, daß noch ungekannte Wasserstraßen und Triften existierten, welche auch dem scheinbar viel kälteren Fundorte einen milden Winter gaben.

In betreff Grinnellands müßte, falls seine Tertiärflora keine sehr tiefen Kältegrade ertrug, angenommen werden, daß es zur Zeit, aus welcher seine Flora stammt, durch eine von Süden gekommene laue Trift erwärmt wurde. Zur Annahme, daß dieselbe durch die Davisstraße und Baffinsbay (welche Matthew als wegsam zeichnet) gekommen wäre, wird man sich nicht leicht entschließen mögen. Nachdem die Richtung dieses Wasserweges heute das Einlenken eines kräftigen Astes des Golfstromes nicht zuläßt, müßte es sich im Tertiär wohl ähnlich verhalten haben. Die Supponierung einer weiter westwärts in NO- oder NNO-Richtung verlaufenen Triftströmung käme aber den Geographen des Tertiärs wohl als Ungeheuerlichkeit vor. Allerdings ließe sich ein Umstand namhaft machen,

welcher es begründen könnte, warum sich tertiäre marine Schichten zwar in Westsibirien erhalten konnten, im subarktischen Nordamerika aber gänzlicher Zerstörung anheimfielen: das erstere Gebiet blieb in der Quartärzeit unvergletschert, das letztere war der Schauplatz der gewaltigsten Entfaltung des diluvialen Glazialphänomens.

Meeresströmungen, deren frühere Existenz sich nicht auf das Vorkommen mariner Schichten stützt, werden zwar manchmal auch auf Grund von Faunenähnlichkeit oder -gleichheit in Erwägung gezogen; demjenigen, der dafür eintritt, daß die paläogeographischen Ergebnisse in exakterer Weise als bisher zur Grundlage der paläoklimatischen Forschung gemacht werden, fällt es aber schwer, gleichzeitig Gesichtspunkte heranzuziehen, durch welche jene Grundlagen selbst noch unsicherer würden, als sie ohnedies sind. So wäre es ganz unstatthaft, an den Rekonstruktionen — soweit sie zweifelhaft sind — so lange zu ändern und hypothetische Warm- und Kaltwasserströme zu konstruieren, bis sich die geologischen Klimarätsel ohne hypothetische Aenderungen des Solarklimas lösen könnten. Manchmal würden sich so weitgehende Umformungen der paläogeographischen Karten auch wohl ausschließen. Dagegen glaube ich, daß paläoklimatologische Gesichtspunkte in Fällen zweifelhafter Rekonstruktion mit Vorteil dazu herangezogen werden könnten, um sich für eine unter mehreren möglichen Linienziehungen zu entscheiden.

Wenn nun schon hypothetische klimatische Hilfsfaktoren herangezogen werden, so sollten hiebei die Ergebnisse der Meteorologie auch mehr berücksichtigt werden, als dies manchmal der Fall ist. Wenn *Frech* annimmt, daß die von *Arrhenius* für den Gleicher berechnete Temperatursteigerung um 7.3 (bei Verdreifachung des CO_2 -Gehaltes der Luft) deshalb unterdrückt bliebe, weil im äquatorialen Gürtel eine Wärmezunahme mit Steigerung der Verdunstung und Wolkenbildung verknüpft ist und diese wieder die Insolation hemmt, so müßte er folgerichtig auch annehmen, daß in den Roßbreiten, wo auch über stark erwärmten Meeresflächen die Wolkenbildung unterdrückt ist, die berechnete Temperatursteigerung voll zur Entwicklung käme.

Nun gibt es allerdings drei Umstände, welche es bedingen können, daß die größte Hebung der Flächen gleichen Druckes auch dann über dem Aequator stattfindet, wenn die Temperatur an der Erdoberfläche nicht am Aequator am höchsten ist. Erstens ist trockene Luft schwerer als dunstgesättigte und kann so innerhalb gewisser Grenzen gegen kühlere und feuchtere hinfließen. Zweitens ist über erhitzten Meeresflächen (und in geringem Maße auch über Sumpfland und tropischem Regenwald) wegen der vielen stattfindenden Kondensationen die Wärmeabnahme mit der Höhe langsamer und die mittlere Temperatur der ganzen Luftsäule höher als über am Boden stärker erhitzten Kontinentalflächen. Drittens ist die Erwärmung der ganzen Luftsäule wegen der Wärmeabsorption in der Atmosphäre auch von der Insolation (an der Grenze der Lufthülle) abhängig und diese ist im Jahresdurchschnitte über dem Aequator am stärksten. Diese Umstände müssen aber schon herangezogen werden, um es zu erklären, warum sich der niedrige Luftdruck, ausgenommen im Süden Eurasiens, im Jahresmittel nicht weit vom Aequator entfernt, da ja auch sonst zum Teile Bedingungen für ein Abrücken der Kalmenzone aus dem äquatorialen Gürtel gegeben schienen.

Würde die Temperatur in den Roßbreiten ganz allgemein um 7 bis 8⁰ zunehmen, ohne sich gleichzeitig im äquatorialen Gürtel zu ändern, so müßte dies aber doch eine wesentliche Alteration des tropischen Luftaustausches zur Folge haben.

Die Verhältnisse, welche in einem ozeanischen Tropengürtel im Winter einträten, würden jenen ähnlich, welche jetzt dort im Sommer herrschen, wenn die Temperatur am Wendekreise jener am Aequator ungefähr gleichkommt (24 bis 26⁰), die jetzigen kräftigen Passatströmungen würden sich abschwächen.

Zur Beurteilung der Verhältnisse, welche sich in einem ozeanischen Tropengürtel im Sommer einstellen würden, käme zunächst jene Sachlage in Betracht, welche sich jetzt im Süden Eurasiens und im Norden Australiens im Sommer zeigt, wo die Temperatur 8 bis 10⁰ höher ist als die gleichzeitige am Aequator. Es würden sich südwestliche, bzw. nordwestliche Winde einstellen und dieselben wären vermutlich stärker als der jetzige SW- und NW-Monsun, weil sich ja über einem Meere mit etwa 34⁰ Oberflächentemperatur die Flächen gleichen

Druckes mehr heben würden als über ebenso erhitzten Ländern. Es wären also im Sommer jeder Hemisphäre rings um die Erde starke, gegen den Wendekreis zu gerichtete Winde, im Winter flau Passate zu erwarten.

Erstere schienen wohl zunächst zur Abfuhr tropischen Ozeanwassers in höhere Breiten günstiger als NO- und SO-Winde, aber sie würden in den großen Meeresbecken schon innerhalb der Subtropen einen zyklonalen Stromkreis mit gegen den Gleicher zu gerichtetem rückläufigen Aste veranlassen und die Bedingung für einen reichlichen Abtransport von Tropenwasser in hohe Breiten ist ja die, daß das im rückläufigen Bogen einer subtropischen Antizyklone fließende Wasser direkt von dem polwärts gerichteten Aste einer subarktischen Zyklone zum Weitertransporte übernommen wird. Daß, falls das Gebiet mittleren niedrigen Luftdruckes (im Meeresniveau) mehr an die Grenzen der Tropen rücken könnte und das Aequatorialgebiet eine Zone höheren Druckes (im Meeresniveau) würde, weiter polwärts ein engerer Gürtel von hohem Luftdrucke zustande käme, ist nicht anzunehmen. Da ja in 30⁰ Breite schon eine starke westöstliche Komponente vorhanden ist, könnte auch in größeren Höhen nicht sehr viel Luft polwärts abfließen. Der Abfluß würde in der Höhe mehr gegen den Aequator zu gerichtet sein.

Im Winter, wenn noch eine Passatströmung bestünde, würde aber wegen der in der anderen Hemisphäre stark entwickelten, vom Aequator weg wehenden Winde ein Teil des Tropenwassers in diese andere Halbkugel hinübergezogen werden, dort aber auch den hohen Breiten nicht zugute kommen.

Nun hängt die Wolkenarmut der Roßbreiten von denselben atmosphärischen Vorgängen ab, welche eine kräftige Passatströmung bedingen und Luftdruckänderungen, die ein starkes Abflauen der Passate mit sich brächten, zögen für die Roßbreiten wohl auch den Verlust der Wolkenlosigkeit nach sich. Der Himmelszustand würde sich dem im Doldrumgürtel nähern. Dann schiene allerdings der ursprüngliche Anlaß zur Alteration des Luftkreislaufes beseitigt, aber wenn sich dieser Kreislauf wieder in Gang bringen wollte, so daß die Roßbreiten wieder ein Gebiet mit niedersinkender Luft und Wolkenlosigkeit würden, hätte dies eine neuerliche Zirkulationsstörung zur

Folge. So käme es dahin, daß in hohen Breiten die Temperaturzunahme infolge verminderter Wärmeausstrahlung durch eine bedeutende Abschwächung der Warmwasserheizung wettgemacht würde.

Vermutlich würde aber gar keine so vollständige Umwälzung im atmosphärischen Regime Platz greifen, daß es zu einer förmlichen Vertauschung der Rollen käme, welche jetzt der äquatoriale Gürtel und die Randzonen der Tropen spielen. Vermutlich träte die von Frech angenommene völlige Unterdrückung des berechneten Wärmezuwachses von 7.3° (bei Verdreifachung des CO_2 -Gehaltes der Luft) am Aequator gar nicht ein (obschon sie ein sehr erwünschtes Resultat der Deduktion wäre). Aus Frechs Darlegung geht nicht ganz klar hervor, warum gerade jetzt für die Tropen ein thermisches Optimum vorhanden ist und dasselbe bei einer positiven Aenderung des Solarklimas anhielte, warum der Gesamteffekt einer Steigerung der Erwärmung (Abnahme der Ausstrahlung) und hierdurch bedingten Vermehrung der Verdunstung und Wolkenbildung und Verminderung der Insolation nicht doch noch eine Temperaturerhöhung sein könnte und warum nicht schon jetzt das Optimum überschritten ist, das heißt, bei geringerer Erwärmung (stärkerer Ausstrahlung) wegen der dann schwächeren Verdunstung und Wolkenbildung und weniger behinderten Insolation eine höhere Temperatur herrschen würde als jetzt.

Daß sich die Aenderungen in den klimatischen Relationen der verschiedenen Erdgürtel zueinander, welche bei Schwankungen des Solarklimas Platz greifen würden, „nicht so leicht deduktiv entwickeln lassen“, wird selbst von Hann zugegeben. Aber wer schon eine paläoklimatische Hypothese aufstellt, sollte sich auch mit diesen Aenderungen so eingehend beschäftigen, wie dies Dubois getan hat. Dieser versuchte es mit Geschick, den schwierigen Beweis zu führen, daß eine Steigerung der Intensität der Sonnenstrahlung, welche ja eine Verschärfung des Insolationsunterschiedes zwischen Pol und Aequator bedeuten würde, doch zu einer Milderung des Wärmeunterschiedes zwischen hohen und niedrigen Breiten hätte führen können. Eine paläoklimatologische Hypothese sollte, zumal wenn sie den Titel „Theorie“ beansprucht, nicht bloß experimentell physikalisch und geologisch, sondern auch me-

teorologisch durchgearbeitet sein. Die ihr zugeschriebene doppelte Fähigkeit, milde Polarklimate und eine bedeutende Abschwächung des Wärmekontrastes zwischen Pol und Äquator zu erklären, dürfte der Kohlensäurehypothese wohl nicht zukommen.

Aber nicht allein die Rekonstruktionen des Erdbildes früherer Perioden, auch die Ergebnisse der geologischen und paläobiologischen Forschung sind zum Teile noch nicht so weit gesichert, als dies zum Verständnisse der Klimate der Vorzeit nötig wäre. Bis vor kurzem wurde allgemein angenommen, daß die permokarbone Vergletscherung ein Phänomen gewesen sei, das sich im Umkreise des Indik, wenn auch nicht ausschließlich, so doch am großartigsten entfaltet habe. Unlängst sprach aber Philippi die Ansicht aus, daß es sich auch hier um eine über den ganzen Erdball verbreitete Eiszeit gehandelt habe und daß sich nur die Reste derselben innerhalb der altweltlichen Tropen in viel höherem Maße als außerhalb derselben erhalten hätten. Es ist klar, daß es ein müßiges Beginnen wäre, den Ursachen der jungpaläozoischen Kälteperiode nachzuspüren, solange es noch nicht feststeht, ob dieselbe ein regionales Phänomen oder eine Allgemeinerscheinung war.

Nachdem man anfangs angenommen hatte, daß die Steinkohlenpflanzen in einer heißen, dunstgesättigten Atmosphäre gelebt hätten, brach sich allmählich die Ansicht Bahn, daß diese Pflanzen auf ein zwar gleichmäßiges und feuchtes, aber keineswegs sonderlich warmes Klima hinweisen. Inzwischen sind aber die lange gesuchten tropischen Torfmoore gefunden worden und wird von Potonié jetzt neuerdings die Anschauung vertreten, daß die karbonische Pflanzenwelt die Flora eines Tropenklimas gewesen sei. Während man bis vor kurzem mit Vorliebe darauf hinwies, daß Baumfarne noch im kühlen südlichen Chile ihre Existenzbedingungen finden, legt Potonié das Hauptgewicht darauf, daß baumartige Filizineen doch vorzugsweise Charakterpflanzen der heißen Zone sind. Es ist klar, daß es ein müßiges Beginnen wäre, sich über die Ursachen des Klimas der Karbonzeit Gedanken zu machen, solange es noch nicht feststeht, ob dasselbe ein gemäßigtes oder ein heißes Klima war.

Die Frage, ob und inwieweit Analogieschlüsse auf das Wärmebedürfnis fossiler Organismen statthaft sind, ist eine oftmals aufgeworfene, sehr verschieden beantwortete und wahrscheinlich von Fall zu Fall auch verschieden zu beantwortende Frage. Bei einer meteorologischen Betrachtung des paläothermalen Problems ist in dieser schwierigen Frage ein klar umschriebener Standpunkt vorgezeichnet. Die Fossilien sind für den Paläoklimatologen der Ersatz für die nicht vorhandenen Mittelwerte und Grenzwerte der Wasser-, Luft- und Bodentemperaturen und müssen darum genau so wie diese behandelt werden. Nun ist es in der Meteorologie wohl üblich, an den durch Beobachtung gewonnenen Werten mannigfache Rechenoperationen vorzunehmen. Der Meteorologe pflegt Mittelbildungen mit gleichem und ungleichem Gewichte, Ausgleichungen, Korrekturen und Reduktionen durchzuführen, dies alles aber nach bestimmten Regeln und Erwägungen; niemals könnte es ihm aber in den Sinn kommen, einen beobachteten Wert als solchen willkürlich zu verändern. Erscheint eine Beobachtung als sehr zweifelhaft, so darf sie ausgeschaltet werden, ihre willkürliche Verbesserung wäre aber gänzlich unstatthaft. Ebenso müßte es als völlig unzulässig angesehen werden, den durch Analogieschluß sich ergebenden Wärmewert eines Fossils mit Willkür umzuändern. Gewiß wird man es niemals feststellen können, ob auch die devonischen Riffr Korallen nur in warmem Meerwasser leben konnten und ob die jurassischen Zykadeen nur in feuchtheißer Tropenluft zu gedeihen vermochten. Wenn man aber schon von der Möglichkeit ausgeht, daß erstere auch in kaltem Wasser ihre Daseinsbedingungen fanden und letztere auch Trockenheit und Frosttemperaturen ertrugen, so wird der paläoklimatischen Forschung jeder sichere Halt entzogen. Selbst die vielleicht manchem hier als passendster Mittelweg dünkende Zulassung von thermischen Analogieschlüssen innerhalb weiterer Grenzen würde im obigen Sinne schon zu bemängeln sein. Als fixer, nicht selbst schon willkürlich verschobener Ausgangspunkt für die Betrachtung empfiehlt es sich nur, jedem fossilen Organismus genau jenes Wärmebedürfnis zuzuschreiben, welches der ihm am meisten ähnliche rezente Organismus durchschnittlich aufweist. Dem Eventualfalle, daß das Rätsel der fossilen arktischen Floren doch in einem wesentlich geringeren Wärme-

bedürfnisse der früheren Pflanzen seine Lösung fände, wird durch das eben aufgestellte Postulat keineswegs vorweggegriffen, wie auch die wiederholt erwogene Möglichkeit, daß jene Floren gar nicht in den hohen Breiten, in denen man ihre Reste findet, gewachsen seien, durch die geographische Betrachtungsweise noch keineswegs abgelehnt erscheint. Die auf Grund genauer thermischer Analogieschlüsse sich ergebenden Wärmewerte der fossilen Organismen und die mit Hilfe klimatologischer Formeln sich aus den Rekonstruktionen ergebenden Temperaturverteilungen müssen aber die relativ sichere Grundlage der paläoklimatischen Forschung bilden.

Wenn man bei der Betrachtung schon davon ausgeht, daß die Riffkorallen des hochnordischen Paläozoikums auch in kaltem Wasser gelebt haben könnten oder die Betrachtung schon damit beginnt, daß die diese Reste einschließenden Schichten erst in hohe Breiten hinaufgelangt sein könnten, wird man niemals zum Ziele kommen. Es war darum eine ganz unglückliche Idee Pencks, beim dermaligen Stande der Dinge große horizontale Bewegungen der Erdkruste den Paläoklimatologen als ernste Arbeitshypothese anzurühmen. Das hieß, nicht bloß Oel ins Feuer gießen, sondern Benzin in den Hexenkessel schütten, aus dessen brodelndem Gischt die Fratzen gesichter der tollen Phantastereien von wanderlustigen Erdpolen schreckhaft hervorglinsen. Analytische Darstellungen des Einflusses von Land und Meer auf die Temperaturverteilung im Anschlusse an die ersten von Forbes, Spitaler und mir gemachten diesbezüglichen Versuche und möglichste Verbesserung der paläogeographischen Karten sind auf lange Zeit hinaus genug ernster und genug umfangreicher Arbeitsstoff. Solange in den noch wenig genau erforschten oder erforschbaren Erdräumen die Rekonstruktionen nur ausdrücken sollen, ob man das Vorhandensein eines Kontinents oder eines Ozeans annimmt, wäre es naturgemäß ein kindliches Unterfangen, aus abgemessenen prozentischen Verteilungen von Land und Meer schon für den betreffenden Zeitabschnitt gültige thermische Schlußfolgerungen zu ziehen. Solche Rechnungen sind von rein theoretischem Interesse.

Fortschritte auf paläoklimatologischem Gebiete sind so, wie dies jüngst auch W. Eckardt wieder betont hat, aufs innigste mit solchen in der Paläogeographie verknüpft. Da den

kartographischen Darstellungen früherer Perioden aber stets viel Hypothetisches anhaften wird, erscheint auch die Paläoklimatologie überhaupt nur innerhalb nicht sehr weiter Grenzen entwicklungsfähig. Durch diesen Ausblick in die Zukunft wird das vorhin entrollte Bild vom Stande der paläoklimatischen Forschung allerdings noch weniger erfreulich; für die hoffnungsvolle gegenteilige Ansicht, daß sich die großen Klimarätsel der Vorzeit nun doch schon allmählich entschleiern dürften, liegt aber noch kein Grund vor.
