

Überreicht vom Verfasser.

SITZUNGSBERICHTE

1928.

VI.

DER PREUSSISCHEN

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 23. Februar.
Mitteilung vom 3. Februar 1927.

Die Ursachen der Eiszeit.

VON ALBRECHT PENCK.

Die Ursachen der Eiszeit.

VON ALBRECHT PENCK.

Über das Klima der Eiszeit wurden die ersten greifbaren Anhaltspunkte erhalten, als Maße für die Herabdrückung der eiszeitlichen Schneegrenze gewonnen wurden. JOSEPH PARTSCH hat hier den richtigen Weg gewiesen. Jene Herabdrückung kann zwei Ursachen haben, entweder eine Erniedrigung der Temperatur insbesondere der Sommermonate oder eine Mehrung der Schneeniederschläge. Die Tatsache, daß die Herabdrückung in ozeanischen Gebieten eine größere ist als in kontinentalen, erweist, daß beide Ursachen zusammen wirken. Indes läßt sich der Anteil des einen oder anderen nicht ohne weiteres erweisen.

Im großen Becken von Nordamerika zwischen Wasatchgebirge und Sierra Nevada liegen große geschlossene Hohlformen, die heute des Abflusses entbehren, oder die nur teilweise an ihrem Boden mit Wasser erfüllt sind. Früher waren die einen bis zum Überlaufen voll. Am Westfuße des Wasatchgebirges dehnte sich der große Bonnevillesee, der über den Red Rock-Paß zum Snake River überfloß. Dagegen waren die Vertiefungen am Ostfuße der Sierra Nevada nur teilweise, wenn auch in weitem Umfange von Wasser erfüllt. Hier dehnte sich der Lake Lahontan, der das Gebiet des unteren Humboldtflusses und der nachbarlichen Senken einnahm und keinen Abfluß besaß. Durch die ausgezeichneten Untersuchungen von G. K. GILBERT und J. C. RUSSEL¹ sind wir über die beiden alten Seen genauer unterrichtet. GILBERT hat gezeigt, daß eiszeitliche Gletscher sich bis in den Bonneville-See erstreckten. Er gehört zu den Gebilden des Eiszeitalters und war während der letzten und vorletzten Vergletscherung vorhanden. Der Gedanke liegt nahe, daß beide Seen in einer Zeit existierten, die wesentlich niederschlagsreicher als heute war; aber südlich von beiden waren die meisten Hohlformen des großen Beckens auch zur Eiszeit leer². Nicht in allen der hier vorhandenen geschlossenen Becken sieht man Uferlinien, wie solche an den Gestaden des alten Bonneville-sees sehr auffallen.

¹ G. K. GILBERT, Lake Bonneville. Monographs U. S. Geological Survey I, 1890. J. C. RUSSEL, Geological History of Lake Lahontan. Ebd. XI. 1885.

² A. PENCK, Die Morphologie der Wüsten. Verhandl. XVII. D. Geographentag Lübeck 1909, S. 125.

OSCAR E. MEINZER¹ hat im Großen Becken 125 geschlossene Hohlformen gezählt, aber nur in 68 sind Seen der Quartärperiode nachweisbar. Von diesen liegen 50 nördlich 37° N. Er findet, daß der Zustand während des Quartärs jeweils ähnlich dem gegenwärtigen in weiter nördlich gelegenen Gebieten von 8,2° geringerer Temperatur gewesen ist. Er erkennt, daß das Studium der Hohlformen die Möglichkeit bieten wird, das Klima der Quartärperiode klar zu erfassen, aber er überläßt die Lösung der Aufgabe, inwieweit Änderungen von Temperatur und Niederschlag geschehen sind, späteren Untersuchungen. Auch ERNST ANTEVS² geht nicht an die Frage heran. Ihm danken wir eine umfassende Sammlung der einschlägigen Literatur und die kritische Erörterung einiger Fragen über die Entstehung des Bonneville-sees.

Der im folgenden zu machende Versuch geht von der Tatsache aus, daß während der Eiszeit im Großen Becken drei verschiedene Fälle nebeneinander vorkamen: leere Wannen neben beinahe gefüllten und überlaufenden. Die nachbarliche Lage und die Gleichheit der Umgebung schließen aus, daß es sich dabei um große klimatische Verschiedenheiten handelte. Das Große Becken in seiner Gesamtheit lag beiderseits der Grenze der Abflußlosigkeit. Ausgeschlossen ist daher, daß es voll humid war. Es war teils semiarid bis arid, teils leicht humid, und die Erfüllung seiner einzelnen Wannen mit Wasser kann daher nicht auf eine fundamentale Änderung der Niederschlagsverhältnisse zurückgeführt werden.

Vergegenwärtigen wir uns die Funktionen eines Endsees. Auf seinem Spiegel mit der Fläche S zehrt die Verdunstung (v) nicht bloß den fallenden Niederschlag (n), sondern auch den Abfluß a vom Einzugsgebiet E . Es gilt die Formel:

$$S \cdot v = S \cdot n + E \cdot a.$$

Für einen See mit einem Abfluß der Menge F gilt:

$$S \cdot v + F = S \cdot n + E \cdot a.$$

Setzen wir die Abflußmenge F gleich der Abflußhöhe f bezogen auf den Seespiegel S , so läßt sich die letztere Formel wie folgt schreiben:

$$v + f = n + \frac{E}{S} \cdot a.$$

Für den Lahontansee ist nach RUSSEL $S = 21800$ qkm, $E = 105600$ qkm. Es gilt also die Gleichung:

$$21800 v = 21800 n + 105600 a,$$

danach

$$(1) \quad v = n + 4.83 a.$$

¹ Map of the Pleistocene Lakes of the Basin-and-Range Province and its Significance. Bull. Geol. Soc. of America XXXIII. 1922. S. 541.

² On the Pleistocene History of the Great Basin. Publication No. 352 of the Carnegie Institution of Washington. 1925. S. 51. The Last Glaciation. Amer. Geogr. Soc. Research Series 17. 1928.

Für den Bonneville-See ist $S = 51200 \text{ qkm}$; $E = 140000 \text{ qkm}$,
danach

$$(2) \quad v + f = n + 2.73 a.$$

Für ein beliebiges leeres Becken gilt:

$$(3) \quad v = n + \frac{E}{S} \cdot a.$$

In leeren Becken fehlen die Flüsse. Es ist also $a = 0$. Aber es ist auch die Seefläche $S = 0$. Es ergibt also obige Gleichung keinen bestimmten Wert, und es läßt sich nur das sagen, was auch für den Lahontan-See ohne weiteres und wahrscheinlich auch für den Bonneville-See gilt $v > n$. Der Spiegel des alten Bonneville-Sees lag, wenn man von der Deformation seiner Uferlinien absieht, in 1580—90 m Höhe, der des Lahontan-Sees in 1340 m Höhe, also rund 250 m tiefer. Der aus Gleichung (1) sich ergebende Wert der Verdunstung

$$v - n = 4.83 a$$

ist für den Bonneville-See aller Wahrscheinlichkeit nach zu groß. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß die Abflußhöhen für die Einzugsgebiete beider Seen nicht gleich groß waren, wir müssen zwischen der des Lahontan-Sees a_1 und der des Bonneville-Sees a_b unterscheiden. Wenn wir nun den aus Gleichung (1) hergeleiteten Wert von $v - n$ in Gleichung (2) einsetzen und schreiben

$$4.83 a_1 + f = 2.73 a_b,$$

so ist klar, daß wir für f einen zu kleinen Wert erhalten, wenn wir setzen

$$f = 2.73 a_b - 4.83 a_1.$$

Immerhin kann letztere Gleichung zur Orientierung dienen, wenn wir f als sehr klein annehmen. Setzen wir es $= 0$, so ergibt sich

$$a_b = 1.8 a_1,$$

d. h. die Abflußhöhe im Einflußgebiete des Bonneville-Sees war mindestens 1.8mal so groß als die im Einzugsgebiete des Lahontan-Sees. Das erscheint plausibel angesichts der Tatsache, daß der Bonneville-See namentlich vom Wasatchgebirge gespeist wurde, während der Lahontan-See seinen Hauptzufluß von dem Humboldtfluß aus dem großen Becken erhielt, gegen welchen die kleineren Zuflüsse von der Ostseite von der Sierra Nevada zurücktraten.

Am Boden des alten Lahontan-Sees strecken sich heute mehrere einzelne Seen, die das Ende von Flußläufen darstellen. In den Carson Sink fließen der aus dem großen Becken kommende Humboldtfluß und der von der Sierra Nevada kommende Carsonfluß; der erstere passiert zuvor den 50 qkm messenden Humboldtsee und führt diesem im Mittel von 5 Jahren 215 Millionen cbm zu, manchmal endet er hier. Der Carsonfluß hat oberhalb des Carson Sinks eine jährliche Wasserführung von 367 Millionen cbm, die auf seiner 326 qkm messenden Oberfläche sowie auf der des kleinen Carson-Sees (21 qkm) verdunsten.

Die Verdunstungsflächen messen also rund 400 qkm, darauf verdunsten jährlich 582 Millionen cbm Flußwasser; danach ergibt sich der gegenwärtige Wert von $v - n$ zu 1455 mm. Die Niederschlagshöhe n im Bereiche des Carson Sinks ist weniger als 125 mm, die gesamte Verdunstungshöhe v auf dem Gebiete der Seen ist also rund 1555 mm. Im Mittel fließt den Seen von dem Einzugsgebiet beider Flüsse (38800 qkm) 15 mm Wasser zu. Wir sehen also, daß ein Gebiet von 15 mm Abflußhöhe heute im wesentlichen leer ist. Eine kleine Pfanne, die rund 1% ihres Einzugsgebietes einnimmt, genügt, um alles zuströmende Wasser zu verdunsten. Nach Gleichung (3) ergibt sich die Verdunstungshöhe

$$v = 1555 = 100 + 97 \cdot 15 \text{ mm.}$$

Diese Gleichung gibt wahrscheinlich nicht die natürlichen Verhältnisse wieder; denn der Humboldtfluß wird unmittelbar, bevor er den Humboldtsee erreicht, in ausgedehntem Maße zur Bewässerung herangezogen, und 1881 sah J. C. RUSSEL den Carson Sink trocken. Das Quadrangle Carson Sink der topographischen Karte 1:125000 der Vereinigten Staaten umgibt den Sink und den See noch mit einer weiteren Grenze, wohl der des zeitweilig überfluteten Gebietes. Die eingeschlossene Fläche ist für den Carson Sink 581 qkm, für den Carson Lake 65 qkm; die Größe der Verdunstungsfläche im Endgebiete des Humboldt- und Carsonflusses kann daher einschließlich des Humboldtsees bis auf 700 qkm wachsen. Dann ergibt sich die Verdunstungshöhe, wenn wir den Niederschlag etwas größer als vorhin ansetzen

$$v = 950 = 125 + 55 \cdot 15 \text{ mm,}$$

also ein wesentlich geringerer Wert. Wenn wir annehmen, daß die Abflußhöhe bei den Hochständen der Verdunstungspfannen gewiß größer als im Mittel ist, finden sich noch geringere Werte für die Verdunstung auf den Pfannen. Sie schwankt um sehr bedeutende Beträge. Im Mittel nehmen wir einstweilen ihren Wert an zu

$$v = 1250 = 110 + 76 \cdot 15 \text{ mm.}$$

Leider reicht das Beobachtungsmaterial nicht hin, um den Ursachen der sehr großen Schwankungen der Verdunstung auf den Pfannen nachzugehen. Zwar sind wir über die Wasserführung vom Humboldt- und Carsonflusse seit Jahren unterrichtet und kennen auch einiges von den Niederschlags- und Temperaturverhältnissen des Gebietes, aber von den Schwankungen im Flächeninhalt der Verdunstungspfannen wissen wir nichts.

Zwei Möglichkeiten existieren, den Carson Sink in einen Lahontan zu verwandeln: Steigerung der Niederschläge und damit des Abflusses oder Minderung der Verdunstung. Die erstere Möglichkeit ist nur in sehr beschränktem Umfange anwendbar; denn eine Steigerung der Niederschläge müßte sich auch in den südlich benachbarten geschlossenen Becken bemerkbar machen und sie mit Wasser füllen. Das ist nicht geschehen. Hier können also nur geringe Abflußhöhen geherrscht haben. Wie sich die Verhältnisse bei einer Steigerung der Niederschläge ändern, falls sich die Verdunstung nicht ändert,

zeige ein Beispiel. Nehmen wir an, daß der Niederschlag auf dem Lahontan 400 mm betragen habe, so ergibt sich unter Voraussetzung einer Verdunstungshöhe gleich der heutigen nämlich 1555 mm nach Gleichung (1) eine Abflußhöhe von 240 mm. Bei einer solchen oder einer ähnlichen, wenn auch wesentlich geringeren, können die südlich benachbarten Becken nicht leer geblieben sein¹. Geht man von diesen letzteren aus und nimmt eine Abflußhöhe doppelt oder dreimal so groß an, wie sie heute das leere Carson Sink-Becken hat, nämlich 30 und 45 mm, so erheischt Gleichung (1) für den Lahontan bei einer Verdunstungshöhe von 1555 mm Niederschlagshöhen von 1410 bzw. 1340 mm. Diese aber sind mit so geringen Abflußhöhen unvereinbar. Kein Gebiet mit 1300—1400 mm Niederschlag hat einen Abflußfaktor von nur 7% und ist abflußlos. Die Zahlen werden andere, wenn wir den aus den größten Verdunstungsflächen errechneten Wert für die Verdunstung (950 mm) einsetzen. Wir erhalten dann aus Gleichung (1) bei einer Niederschlagshöhe von 400 mm eine Abflußhöhe von 114 mm, oder bei Annahme von 30 bzw. 45 mm Abflußhöhe bei Niederschlagshöhen von 800 bzw. 730 mm gleichfalls Werte, die unvereinbar mit der Nachbarschaft leerer Becken sind.

Nur unter Annahme einer stark verringerten Verdunstung können wir den Carson Sink in einen Lahontan verwandeln. Die Verdunstung zehrt heute am Humboldtfluß selbst und mindert seine Wassermenge von Palisades bis Oreana beinahe auf die Hälfte; die Abflußhöhe des zugehörigen Einzugsgebietes fällt auf $\frac{1}{5}$. Nehmen wir die von den Palisades (rund 30 mm) und die hier herrschende Niederschlagshöhe (250 mm) zum Ausgang, so ergibt sich eine Verdunstungshöhe von 395 mm, welche den Bedingungen der Gleichung (1) entspricht, ohne daß zur Annahme einer Mehrung der Niederschläge und der Abflußhöhe gegriffen ist. Als der Lahontansee auf 1340 m angeschwollen war, mußte es kühler sein, der Abflußfaktor daher größer als heute. Setzen wir ihn zu 15%, so war die Abflußhöhe bei Palisades 45 mm. Eine solche würde, allseitig dem Lahontan zukommend, bei einer Verdunstungshöhe von 467 mm samt dem auf den See fallenden Niederschlag aufgezehrt werden. Eine Abflußhöhe von 45 mm im gesamten Einzugsgebiete des Lahontan würde mit dem Vorhandensein von leeren Becken südlich davon gerade noch vereinbar sein; denn sie wäre nur für die wenig ausgedehnten über 1340 m Höhe gelegenen Teile derselben anzunehmen, die beim Lahontan namentlich wegen des Anteils der Sierra Nevada und des Humboldtgebirges an seinem Einzugsgebiete schwerer in die Wage fallen. An eine größere Abflußhöhe dürfen wir im Lahontangebiet wegen seiner leer gebliebenen Nachbarschaft nicht denken. Damit ist aber auch irgendeine größere Niederschlagshöhe für den Lahontan ausgeschlossen, als wir heute in seinem Einzugsgebiete haben. Die Eiszeit erscheint hiernach nicht als eine Periode gesteigerter Niederschläge, sondern lediglich als eine solche geminderter Verdunstung, d. h. geringerer Temperatur. Die Bedingungsgleichung lautet also

$$v \text{ Maximum} = 250 + 45 \cdot 4.83 = 467 \text{ mm.}$$

¹ Über die Abflußhöhen in trockenen Gebieten vgl. EBERHARD REICHEL, Der Wasserhaushalt des Coloradogebietes. Geogr. Abh. herausgegeben von A. PENCK. 2. R. 4. 1928. S. 30. u. T. 3.

Setzen wir den hieraus sich ergebenden Maximalwert von

$$v - n = 217$$

in Gleichung (2) für den Bonneville ein, so ergibt sich

$$217 + f = 2.73 a.$$

Eine Mindestabflußhöhe von 80 mm seines Gebietes würde ihn also zum Überfließen bringen. Eine solche Abflußhöhe erscheint bei den heutigen Niederschlagsverhältnissen des Great Salt Lake-Gebietes gewährleistet. Allein der Bear- und Weber-River sowie der Jordan führen ihm jährlich aus einem Gebiete von 27500 qkm eine 120 mm mächtige Wasserschicht zu, dazu kommen noch die wasserreichen kleinen Flüsse der Gegend von Ogden und Salt Lake City; wir müssen daher mit einer Verdunstungshöhe auf dem Salt Lake von rund 900 mm rechnen — naturgemäß weniger als für den Carson Sink. Das Einzugsgebiet des Bonneville-sees griff allerdings über das des Salt Lake weit hinaus. Aber es streckte sich im wesentlichen am Fuße des Wasatchgebirges, wo heute allgemein über 400 mm, an den höchsten Stellen über 500 mm Niederschlag fallen. Die Abflußhöhe ist hier im Bereiche des Bear-River 125 mm, am Weber-River 179 mm; im Durchschnitt dürfen wir sie zu 120 mm schätzen. Während des Hochstandes des Bonneville-sees war sie gewiß größer; denn das Klima war damals, wie wir im Lahontangebiet erschlossen haben, kühler. Dazu kommt noch etwas weiteres. Die alten Uferlinien des Bonneville sind am Wasatchgebirge viel stärker ausgeprägt als auf der entgegengesetzten Westseite des Sees; auch im einzelnen sind sie an den gegen West exponierten Stellen kräftiger entwickelt als an den gegen Osten gerichteten. Wir müssen daher auf herrschende Westwinde schließen; sie mußten dem Wasatchgebirge vom Großen See reichliche Niederschläge bringen. Aus diesen örtlichen Ursachen war das Gebirge nicht nur kühler, sondern auch feuchter als heute. Seine eiszeitliche Schneegrenze schätzt MACHATSCHEK nach ATWOODS Untersuchung im Westen auf 2500 m, im Osten auf 2800 m; seine Abflußhöhen dürften an 200 m herangereicht haben. Wenn sein westliches Einzugsgebiet nur 40 mm lieferte, so hatte im Durchschnitt das Bonnevillegebiet eine Abflußhöhe von 120 mm; der See selbst aber nach der Gleichung

$$217 + f = 2.73 \cdot 120$$

eine nahezu ebenso große, nämlich 110 mm. Die gesamte Wasserführung seines Abflusses war über 6 Milliarden cbm im Jahre, rund 200 cbm in der Sekunde: ein Fluß, größer als die Moldau an ihrer Mündung in die Elbe, entströmte bei den gemachten Voraussetzungen dem Bonnevillesee, der so groß war wie ganz Böhmen.

Die hier mitgeteilten Zahlenwerte beanspruchen nicht mehr als den Wert von Schätzungen auf Grund von wahrscheinlichen Voraussetzungen. Aber wie man letztere auch wählen möchte, wir können nur dann verstehen, daß während der Eiszeit leere Becken neben beinahe gefüllten und überlaufenden vorhanden waren, wenn wir annehmen, daß die Niederschlagshöhe im Großen

Becken damals nicht größer war als heute, während die Verdunstungshöhe nicht halb so groß wie heute war. Das setzt niederere Temperatur voraus als gegenwärtig. Zwar ist es klar, daß die Verdunstungshöhe des Lahontan und auch des Bonneville schon wegen der größeren Meereshöhe ihrer Spiegel geringer war als die der ihnen heute entsprechenden Seen. Aber dieser aus den Höhenverhältnissen sich ergebende Unterschied der Verdunstungshöhen kann das Anwachsen der Seen nicht erklären, denn er ist dessen Folge. Wir müssen zur Annahme eines allgemeinen Sinkens der Temperaturen greifen, um das Anschwellen der alten Seen zu erklären und aus deren Schwinden auf eine allgemeine Temperaturerhöhung folgern. Wie groß dieselbe war, vermögen wir aus den stattgehabten Änderungen der Verdunstung nicht zu schließen, da die Abhängigkeit der Verdunstung von der Temperatur zu wenig bekannt ist.

Wir können nur einen Vergleich wagen, indem wir den Blick auf das Meer lenken. G. Wüstr¹ hat die hier vonstatten gehende Verdunstung nach Zonen geschätzt. Sie ist zwischen 50° und 60° N 37 cm, zwischen 40° und 50° 66 cm, hier größer, dort geringer als für den Lahontan errechnet. Etwa unter 52° entspricht sie der für den genannten See erhaltenen von 47 cm. Nun ist die Verdunstung auf kleinen Seeflächen immer viel größer als die von der großen Wasserfläche des Ozeans. Die Verdunstung von den Pfannen des Carson Sink und vom Great Salt Lake im Vergleiche mit der Verdunstung auf dem offenen Ozean unter gleicher Breite (78 cm) liefert ein Beispiel dafür. Je größer aber die Binnenseen werden, desto näher kommt ihre Verdunstung der ozeanischen. Die des Lahontan kann daher unmöglich sehr viel größer gewesen sein als die ozeanische unter gleicher Breite. Andererseits muß sich in umgekehrter Richtung eine Verschiedenheit wegen der großen Seehöhe des Lahontan geltend gemacht haben. Nur unter der unerweisbaren Voraussetzung, daß sich beide konträr wirkende Ursachen gegenseitig gerade aufgehoben hätten, könnten wir sagen, daß zur Zeit des Lahontansees an der kalifornischen Küste unter 40° N eine Verdunstung herrschte, wie sie heute für die Küste von Britisch Columbia unter 52° N anzunehmen ist. Der Temperaturunterschied beider Küsten ist 6°. Er ist größer, als wir die eiszeitliche Temperaturerniedrigung annehmen.

Unser Ergebnis, daß die Eiszeit nicht eine besonders niederschlagsreiche, sondern eine nicht unwesentlich kühlere Periode als heute gewesen ist, steht im Einklang mit dem Ergebnis unserer Untersuchungen in den Alpen. Dort hat sich gezeigt, daß die Firnfelder während der Eiszeit nicht voller gewesen sind als heute². Diese Tatsache hat bereits EDUARD RICHTER erkannt. Deutlich sieht man in den inneren Winkeln des Gebirges, wie die Schliftgrenze der eiszeitlichen Gletscher die heutigen unterhalb der Schneegrenze erreicht. Nur in einem Gletschergebiete der Erde, allerdings dem größten, zeigt sich, daß die Firnansammlungen einmal mächtiger gewesen sind als heute, nämlich am Saume von Antarktika, das in seiner ganzen Ausdehnung über der Schnee-

¹ Die Verdunstung auf dem Meere. Veröfentl. d. Inst. f. Meereskunde Berlin, N. F. A. 46 (1920).

² PENCK und BRÜCKNER, Die Alpen im Eiszeitalter 1909, S. 1142.

grenze liegt. E. v. DRYGALSKI¹ hat hieraus den Schluß gezogen, daß dort die Eiszeit eine niederschlagsreichere Zeit war und diesen Schluß für die Eiszeit verallgemeinert. Daß letzteres nicht zulässig ist, geht aus dem Vorstehenden hervor. Aber auch für Antarktika ist die Schlußfolgerung nicht zwingend, denn es bieten sich noch andere Erklärungen für die unzweifelhaft feststehende Tatsache. ED. BRÜCKNER² wies darauf hin, daß bei einer allgemeinen Senkung der Schneegrenze, wie sie für die Eiszeit festgestellt werden muß, auch die theoretisch zu fordernde obere Schneegrenze sich gesenkt habe, an die Antarktika nahe herankomme. Es habe daher der Erdteil zur Eiszeit weniger schneeige Niederschläge gehabt und sei deswegen damals weniger vergletschert gewesen als gegenwärtig. Er kommt wie SCOTT und PHILIPPI zum Ergebnis, daß bei den eigenartigen klimatischen Verhältnissen der Antarktis ein Steigen der Temperatur eine Vermehrung der Eismassen hervorrufen würde. Danach könnte man die unzweifelhaften Anzeichen eines früheren Gletscherhochstandes in Antarktika z. B. auf eine postglaziale Wärmezeit zurückführen, die im Norden vielfach nachgewiesen worden ist. Es bietet sich aber auch noch eine andere Erklärungsmöglichkeit, auf die ich hingewiesen habe³. In Antarktika wird das Gleichgewicht zwischen Schneezufuhr und Eisabfuhr lediglich durch Eisberge hergestellt, die an seinem Saume abbrechen. Letzteres setzt ein bestimmtes Verhältnis zwischen randlicher Eismächtigkeit und Wassertiefe voraus. Nicht nur wenn jene Mächtigkeit sich steigert, sondern auch wenn die Wassertiefe sich mindert, streckt sich der Eisrand weiter äquatorwärts, und wenn dies geschieht, muß seine Mächtigkeit an seiner früheren Lage wachsen. Zur Eiszeit aber lag der Meeresspiegel allenthalben tiefer, weil viel Wasser in den Vergletscherungen ans Land gebunden war. Das antarktische Eis mußte damals allgemein weiter nordwärts reichen als heute, an seinem heutigen Saume also mächtiger sein als gegenwärtig, und mußte in dem Maße seither zurückgehen, als dem Ansteigen des Meeresspiegels entsprach. Deswegen finden wir seinen heutigen Saum von Hochmarken eines früheren Standes umgeben. So vermögen wir den deutlichen Rückgang der antarktischen Vereisung mit dem Rückgange anderer Vergletscherungen in Parallele zu bringen.

Es kann hier nicht der Ort sein, die drei dargelegten Erklärungsmöglichkeiten gegeneinander abzuwägen; es genüge, gezeigt zu haben, daß dieselbe Tatsache in recht verschiedener Weise erklärt werden kann und daß demnach nicht in einer bestimmten Richtung aus ihr Schlußfolgerungen gezogen werden dürfen. Die Marken eines früheren Gletscherhochstandes am Saume Antartikas können so lange, als eine eindeutige Klärung ihrer Ursachen nicht gegeben ist, nicht zum Beweise eines feuchteren Klimas von Antarktika während der Eiszeit, noch gar für ein feuchteres Klima der Eiszeit überhaupt, herangezogen werden. Es bleibt nur eine Möglichkeit, letztere als Kälte-

¹ Die Antarktis und ihre Vereisung. Sitzber. Bayer. Akad. der Wissensch. Math. phys. Kl. 1919. Das Eis der Antarktis. Deutsche Südpolar-Expedition 1901/03. Bd. I. T. IV. Geographie. S. 697—701.

² Die Schneegrenze in der Antarktis. Zeitschr. Gletscherk. VII 1913, S. 276.

³ Sitzber. d. Preuß. Akad. d. Wissensch., Phys. math. Kl. 1927, S. 16.

periode aufzufassen mit Niederschlagsmengen, die keineswegs größer waren als die heutigen.

Das schließt nicht aus, daß die Schneemengen größer waren als gegenwärtig. Wird das Klima kühler, so muß sich der Anteil der schneeigen Niederschläge an den Niederschlägen mehren, und es kann kommen, daß der Schneefall größer wird, während sich die Gesamtsumme der Niederschläge mindert. Daß letztere auch örtlich größer werden können, zeigt uns das Beispiel des Wasatchgebirges. Weiter muß bei einem Kälterwerden des Klimas die Wasserführung der Flüsse bei gleicher Niederschlagsmenge größer werden, weil der Abflußfaktor sich vergrößert, und wiederum ist denkbar, daß gemindertem Niederschlag gesteigerte Flußwassermengen entsprechen. Je größer die Niederschlagsmengen sind, desto mehr wird sich der Einfluß eines Temperatursinkens auf eine Vergrößerung der schneeigen Niederschläge und der Wassermenge der Flüsse geltend machen, desto größer wird die ihr entsprechende Herabdrückung der Schneegrenze werden. Daher geben uns die starken Herabdrückungen der Schneegrenze am Saume der Kontinente einen, weniger guten Einblick in die stattgehabten Klimaänderungen als die weniger starken im Innern der Kontinente. Die hier nachweisbaren¹ Lagen der eiszeitlichen Schneegrenzen, 800 m unter den heutigen, sind fast ausschließlich auf Temperaturänderungen zurückzuführen, deren mittleres Maß an 4°C herankommen dürfte.

In den Tropen hat es lange geschienen, als ob die Herabdrückung der eiszeitlichen Schneegrenze wesentlich geringer gewesen sei als in den gemäßigten Breiten. Aber die Untersuchungen am Kilimandscharo durch FRITZ KLUTE² haben ergeben, daß hier seit der größten nachweisbaren Ausdehnung des Eises sich die Schneegrenze um rund 900 m gehoben hat. Dieser Betrag steht in guter Übereinstimmung mit dem im Herzen der Kontinente der Nordhemisphäre gewonnenen und läßt auch für die Tropen auf eine eiszeitliche Temperaturerniedrigung von etwa 4° schließen, die hiernach allgemein für die Erde angenommen werden kann. Das bedeutet, daß während der Eiszeit die Mitteltemperatur der Erde nur etwas über 10° gewesen ist. Es ist klar, daß einer solch tieferen Mitteltemperatur eine allgemeine geringere Verdunstungshöhe auf den Meeren und eine geminderte Niederschlagshöhe auf dem Lande entsprach. Daß letztere im Großen Becken (mit Ausnahme des Wasatchgebirges) nicht größer gewesen sein kann, als heute, wurde im vorstehenden zu zeigen versucht, daß sie in den Alpen eher geringer als größer war denn heute, ist vor Jahren gefolgert. Die Eiszeit erscheint daher nicht als eine kühlfeuchte Periode ähnlich den kühlfeuchten Jahren der BRÜCKNERschen Periode, sondern als eine kühle an Niederschlägen etwas ärmere Periode.

FREDRIK ENQUIST³ hat die allgemeine Herabdrückung der Schneegrenze während der Eiszeit nicht durch ein allgemeineres Kühlerwerden des Klimas,

¹ Vgl. hierzu FRITZ MACHATSCHKE, Die Depression der eiszeitlichen Schneegrenze. *Zeitschr. f. Gletscherk.* VIII 1914, S. 104. FRITZ KLUTE, Über die Ursachen der letzten Eiszeit. *Geogr. Zeitschr.* 1921, S. 199.

² Ergebnisse der Forschungen am Kilimandscharo 1912, Berlin 1920, S. 131.

³ Eine Theorie für die Ursache der Eiszeit und die geographischen Konsequenzen derselben. *Bull. of the Geolog. Institute of Upsala* XIII 1915, S. 35.

sondern durch ein allgemeines Sinken des Meeresspiegels erklärt, das er auf lokale Einsenkungen des Meeresbodens zurückführt. Nehmen wir an, alle theoretischen Bedenken beiseite setzend, ein solches Sinken sei geschehen, so müßten wir dessen Spuren nicht bloß in einer scheinbaren Hebung des Landes und damit verbundener Senkung der Schneegrenze wahrnehmen, sondern auch auf den kleinen ozeanischen Inseln. Wenn sie 600 m mehr aufragten als heute infolge einer entsprechenden Senkung des Meeresspiegels, so waren sie allesamt den Wirkungen einer starken, durch kräftige Niederschläge verursachten Erosion ausgesetzt und könnten heute weder als niedere Koralleninseln noch als Atolle erscheinen. Deren Vorhandensein widerspricht mit anderem der Ansicht von ENQUIST, und wir können die Ursache der Eiszeit nicht in einem Sinken des Meeresspiegels, sondern in einem allgemeinen Sinken der Höhengürtel, infolge einer leichten Temperaturminderung, erblicken.

Wenn ich hier von der Eiszeit spreche, so ist damit nicht das Eiszeitalter verstanden, das auf der Erde in einem Wechsel von Glazial- und Interglazialzeiten bestand, sondern nur eine einzelne Eiszeit, gewöhnlich die letzte, die der Würmeiszeit der Alpen, der Weichseleiszeit Norddeutschlands oder dem Wisconsin Nordamerikas entspricht. Der große Bonnevillesee hat allerdings mutmaßlich einer früheren Eiszeit entsprochen; während der letzteren war er durch den kleinen See der Provo-Uferlinie ersetzt gewesen. Doch wurde hier auf diese mögliche Altersverschiedenheit nicht Gewicht gelegt; für die Auffassung des eiszeitlichen Klimas als feuchter Periode liegen die Verhältnisse für das Bonnevillestadium günstiger als für das Provostadium, während dessen der See nicht viel kleiner war. Gerade weil wir auch für den ungünstig liegenden Fall dartun konnten, daß das eiszeitliche Klima ein kühleres war als das heutige, fühlen wir uns in dieser Folgerung bestärkt.

Waren die Glazialzeiten die kühleren, die Interglazialzeiten die wärmeren Epochen des Eiszeitalters, so mußten die letzteren ebenso mit einer Steigerung der Niederschlagsmengen verbunden sein, wie die ersteren mit einer stellenweise klar entgegengesetzten Minderung derselben. Es gibt Anzeichen in Europa, die Interglazialzeiten für wärmere und feuchtere Zeiten zu halten und nicht wie bisher geschehen für wärmere und trockenere.

Sonderabdrucke aus den Sitzungsberichten 1926—1928

Verlag der Akademie der Wissenschaften.
In Kommission bei Walter de Gruyter u. Co.

Physikalisch-mathematische Klasse.

R. LADENBURG, H. KOPFERMANN u. A. CARST: Anomale Dispersion angeregter Gase (1 Taf.)	<i>RM</i> 2.—
P. GUTHNICK und R. PRAGER: Kurzbrennweitige photograph. Objektive in der Astronomie	1.—
BIEBERBACH: Über TCHERBYCHEFSche Netze auf Flächen negativer Krümmung	2.—
JOHNSEN: Form und Brillanz der Brillanten	1.—
EINSTEIN: Über die Interferenzeigenschaften des durch Kanalstrahlen emittierten Lichtes	2.—
E. RUPF: Über die Interferenzeigenschaften des Kanalstrahllichtes	
STUDY: Vereinfachte Begründung von LIES Kugelgeometrie. I }	2.—
E. A. WEISS: Zusatz zu dieser Abhandlung	
RUBNER: Beziehung zwischen Nahrungsaufwand u. körperlichen Leistungen des Menschen	2.—
R. BRAUER: Arithmetische und invariantentheoretische Eigenschaften	1.—
FICK: Obere Gliedmaßen des Menschen und Gliedmaßen der Menschenaffen	2.50
PLANCK: Über die Begründung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik	1.—
LANDAU: Der PICARD-SCHOTTKYSche Satz und die BLOCHSche Konstante	1.—
F. SIMON: Thermisch erregte Quantensprünge in festen Körpern	1.—
SCHUR: Zur additiven Zahlentheorie	1.—
EINSTEIN und J. GROMMER: Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz	1.—
SCHLENK: Über die Bedeutung der Radikale für die organische Chemie	1.—
LANDAU: Über die Nullstellen DIRICHLETScher Reihen. Zweite Abhandlung	1.—
EINSTEIN: Zu KALUZAS Theorie des Zusammenhanges von Gravitation und Elektrizität. I }	1.—
EINSTEIN: Zu KALUZAS Theorie des Zusammenhanges von Gravitation und Elektrizität. II }	
HABERLANDT: Zur Zytologie und Physiologie des weiblichen Gametophyten von <i>Oenothera</i>	1.—
SCHUR: Über die rationalen Darstellungen der allgemeinen linearen Gruppe	2.—
J. v. NEUMANN: Zur Theorie der Darstellungen kontinuierlicher Gruppen	1.—
W. KOLHÖRSTER und G. von SALIS: Die tägliche Periode der Höhenstrahlung (1 Taf.)	1.—
GUTHNICK: Helligkeit der vier hellen Jupitersatelliten	2.—
NERNST und W. ORTHMANN: Die Verdünnungswärme von Salzen. II	1.—
E. HOPF: Elementare Bemerkungen über die Lösungen partieller Differentialgleichungen	1.—
KOEBE: RIEMANNsche Mannigfaltigkeiten und nichteuklidische Raumformen. I	2.50
PASCHEN: Die Lichtanregung durch den metastabilen Zustand der Edelgasatome (1 Taf.)	1.—
H. SEIFERT: Die Symmetrie von Kristallen des Pentaerythrit	1.—
R. BRAUER u. E. NOETHER: Über minimale Zerfällungskörper irreduzibler Darstellungen	1.—
H. HASSE: Existenz gewisser algebraischer Zahlkörper	
EINSTEIN: Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz	1.—
v. FICKER: Das meteorologische System von WILHELM BLASIUS	2.—
W. CAUER: Über die Variablen eines passiven Vierpols	1.—
HAHN: Das Protactinium als radioaktives und als chemisches Element	1.—
NERNST: Berechnung der elektrolytischen Dissoziation aus der elektrischen Leitfähigkeit	1.—
A. BRAUER: Über Sequenzen von Potenzresten	1.—
K. REINHARDT: Über die Zerlegung der euklidischen Ebene in kongruente Bereiche	2.—
L. E. J. BROUWER: Intuitionistische Betrachtungen über den Formalismus	1.—
FICK: Bewegungsumfang im Schultergelenk (3 Tafeln)	2.—
PENCK: Die Ursachen der Eiszeit	1.—
G. PÓLYA: Über die Funktionalgleichung der Exponentialfunktion im Matrizenkalkül	2.—
SCHUR: Über die stetigen Darstellungen der allgemeinen linearen Gruppe	

Die Preise verstehen sich in Reichsmark.