eises; auch die den »Gletschern« zugeschriebene Austiefung der U-Täler nur teilweise vom Eis, andernteils von subglazialen Wässern bewirkt.

Die in Obigem entwickelte Überzeugung von der Mitwirkung subglazialer Gewässer sei den Fachgenossen zur geneigten Prüfung empfohlen. Sollte sie Zustimmung finden, so würden auf Grund solcher Auffassung auch manche bisherige Ansichten über Zahl, Art und gegenseitige Beziehungen der glazialen und interglazialen Bildungen einer Nachprüfung zu unterziehen sein.

Über die Kräfte, welche die Kontinentenverschiebungen und Polwanderungen bewirken.

Von Prof. Dr. W. Köppen (Hamburg).

(Mit 3 Textfiguren.)

Als 1912 ALFRED WEGENER seine Lehre von der Verschiebung der Kontinente aufstellte (1), mußte er die Ursachen derselben unerörtert lassen und sich damit begnügen, zu zeigen, wie einfach sich bei dieser Annahme sehr viele bekannte Tatsachen erklären. Eine Fülle solcher Tatsachen aus der Geophysik, Geologie, Paläontologie, Pflanzen- und Tiergeographie machten es ihm wahrscheinlich, daß die Kontinentalblöcke, im Sima schwimmend, im Laufe der Erdgeschichte Bewegungen ausgeführt haben, die einerseits nach dem jeweiligen Äquator, anderseits nach Westen gerichtet waren, und daß die Erdpole große Wanderungen auf der Erdoberfläche ausgeführt haben.

Inzwischen haben sich mehr oder weniger klar auch die Kräfte nachweisen lassen, die zu diesen Bewegungen führen mußten.

Daß schwimmende Körper einer zum Äquator treibenden Kraft unterliegen, ist zunächst qualitativ von EÖTVÖS (2) und KÖPPEN (3) angegeben und dann von EPSTEIN (4), SCHWEYDAR (5) und LAMBERT (6) auch rechnerisch verfolgt worden. Daß eine, wohl noch größere, Kraft vorhanden ist, die sie westwärts treibt, hat SCHWEYDAR (7) ausgesprochen. Die Bedingungen für große Polwanderungen hat SCHIAPARELLI (8) dargelegt, und wenn es auch bis jetzt nicht gelungen ist, deren Zusammenhang mit den Kontinentenverschiebungen rechnerisch nachzuweisen (9), so ist dieser doch so wahrscheinlich, daß dieser Beweis wohl noch geliefert werden wird.

Der Nachweis der Polfluchtkraft besteht in einer Ergänzung zum Archimedischen Prinzip, gilt aber auch für jeden auf einer Nivofläche rollenden oder gleitenden festen Körper. Er beruht auf der Zunahme der Abplattung der Nivoflächen mit wachsendem Abstand vom Erdmittelpunkt. Diese Zunahme ist dadurch bedingt, daß von

den beiden Komponenten der Schwerkraft die Zentrifugalkraft der Erdumdrehung mit abnehmendem Abstand von der Erdachse abnimmt, während die Anziehung der Erde nach dem Erdinnern zu bis über 1100 km Tiefe zunimmt. Der Abstand der Nivoflächen voneinander nimmt also vom Pol nach dem Äquator zu, und die Kraftlinien der Schwere sind gekrümmte, nach dem Pol konkave Linien, wie Fig. 1 dies zeigt.

Fig. 1.

Nun liegt die Oberfläche einer Kontinental-scholle beinahe 5 km höher, als die des Simas, in dem sie schwimmt — für letztere das mittlere Nivo der Tiefsee genommen. Der Schwerpunkt der Scholle liegt also in einem r. $2\frac{1}{2}$ km höheren Nivo als der Angriffspunkt ihres Auftriebs, als welchen man den Schwerpunkt des von ihr verdrängten Simas zu nehmen hat. Gewicht und Auftrieb wirken also nicht genau gegeneinander, sondern bilden zusammen eine kleine Resultante, die zum Äquator gerichtet ist.

Fig. 2 möge dies noch näher erläutern. Sei A der Schwerpunkt der Scholle, AC die Anziehungs-, AB die Zentrifugalkraft in diesem Punkt, so ist AD die Schwerkraft in ihm. Sei D der Auftriebspunkt, so ist $DF > AC$ die Anziehungs- und $DE < AB$ die Zentrifugalkraft im Punkte D . Der Auftrieb, der gleich und entgegengesetzt DG ist, hebt also AD nicht auf, sondern bildet mit ihm einen kleinen Winkel bzw. eine Resultierende, die eben die Polfluchtkraft ist.

Auch ohne Rechnung erkennt man leicht, daß diese Kraft am Pol und am Äquator Null und in etwa 45° Breite am größten ist. Sie ist dem Sinus der doppelten Breite proportional.

Nach W. D. LAMBERTS Berechnung würde ohne Reibung eine Kugel von 1000 m Radius infolge dieser Kraft in $18\frac{1}{2}$ Tagen zum Äquator rollen und dort mit $7\frac{1}{2}$ m/sec. Geschwindigkeit anlangen. Sie wäre dabei um 4 m gefallen, denn die Nivofläche, auf der ihr Zentrum in 60° Breite lag, ist am Äquator 1004 m über dem unveränderten Nivo ihrer Auflagefläche.

Fig. 2.

Die Geschwindigkeit, mit der die Polfluchtkraft eine Sialscholle durch das Sima treiben kann, hängt von der Zähigkeit des letzteren ab. Hier werden die Berechnungen sehr unsicher. EPSTEIN berechnet für einen Zähigkeitskoeffizienten von der Größenordnung 10^{16} eine Geschwindigkeit von 11 m im Jahr. SCHWEYDAR erklärt (a. a. O.), bei so geringer Zähigkeit würde die Polbewegung nach seinen Untersuchungen von der jetzigen völlig abweichen. Man müsse für den Koeffizienten mindestens die Ordnung 10^{19} annehmen

(Siegellack hat etwa 10^9 , Stahl 10^{16}); immerhin erhält SCHWEYDAR bei solcher Zähigkeit (10^{19}), ERFSTEINS Formel als gültig angenommen, für die Geschwindigkeit der Scholle in 45° Breite etwa 20 cm jährlich, also ungefähr gleich der, die WEGENER für die Fortbewegung Südamerikas von Afrika errechnet hat.

Die Größe der Polfluchtkraft in 45° Breite findet SCHWEYDAR zu $1/2000000$, LAMBERT zu $1/3000000$ des Gewichts der Scholle. Das erscheint sehr wenig. Allein man muß bedenken, daß die allein wirksame horizontale Komponente der Flutkraft nur $1/11520000$ der Schwerkraft beträgt und daß bei der Bewegung der Schollen nur die Reibung — einschließlich des Stirnwiderstands — überwunden und keine andre Arbeit geleistet werden muß. Das Sima ist aber, obwohl es zäher als kalter Stahl ist, doch als »Flüssigkeit« zu betrachten, bei der auch ein kleinster Zwang, wenn er nur lange genug fort dauert, eine stetig wachsende Verschiebung der Teilchen hervorbringen kann.

Veranschaulicht man die Kraft durch ein Gefälle, so spielt sich der Vorgang wie auf einer Bahn vom Profile der Fig. 3 ab. A entspricht dem Äquator, PP' den Polen, das stärkste Gefälle ist in M und M'

Fig. 3.

bei 45° Breite. Ein Eisenbahnzug, der auf der Strecke PM ins Rollen kommt, erfährt zunächst eine Zerrung, von M bis M' aber Zusammenschub. Ist die Reibung groß, so bleibt der Zug bei A liegen. Ein Zug, der von M' bis M'' reicht, wird bei P' zerrissen, wenn die Kuppelungen zu schwach sind. Zwei Züge, die gleichzeitig von P und P' abrollen, werden sich in der Nähe von A aufeinander türmen.

Für die zweite Komponente der Bewegung, die Westtrift der Kontinente, findet SCHWEYDAR (a. a. O.) die treibende Kraft in der Präzession. Der Kontinent hat nach ihm das Bestreben, um eine Achse zu rotieren, die von der allgemeinen Rotationsachse etwas abweicht. Die Präzession der Umdrehungsachse eines Kontinents, der zwischen den Breitenkreisen -30° und $+40^\circ$ und den Meridianen 0° und 40° W liegt, ist nach SCHWEYDAR etwa 220 mal größer, als die der Achse der gesamten Erde ist. Hierdurch entstehen Kräfte, die sowohl in meridionaler als in westlicher Richtung wirken und den Kontinent zu verschieben suchen; von diesen kommt aber nur die nach W treibende hier in Betracht, da die meridionale im Laufe des Tages ihre Richtung wechselt. Die Westtrift ist »bedeutend größer als die Polfluchtkraft. Die Kraft ist am stärksten am Äquator, sie ist Null auf den Breitenkreisen $\pm 36^\circ$ «.

Eine genaue Beschreibung des Problems hofft Prof. SCHWEYDAR später geben zu können.

Was die Wirkungen dieser Kräfte betrifft, so berechnet EPSTEIN für die Polfluchtkraft, daß sie durch ihren Druck keine höheren Hügel als 13,5 m auffalten könnte. Allein bei einer bewegten Scholle kommt doch für den unelastischen Stoß die Bewegungsmenge in Betracht, und diese ist wegen der gewaltigen in Frage kommenden Massen auch bei langsamster Bewegung so groß, daß gegen sie alle Vorgänge der Gebirgsbildung Kleinigkeiten sind. Die Anordnung des bekannten Gürtels der jungen Kettengebirge, der Himalaya, Kaukasus, Alpen, Pyrenäen usw. umfaßt, auf einem größten Kreise, der auch nach den klimatischen Zeugnissen zur Zeit ihrer Aufrichtung der Äquator gewesen sein muß, macht es sehr naheliegend, vom Zusammentreffen der Kontinentalschollen am Äquator die Wirkungen zu erwarten, wie von jenem der zwei Eisenbahnzüge bei A auf Fig. 3.

Die Ortsveränderungen der Pole hat in lichtvoller Weise SCHIAPARELLI in einer leider wenig bekannt gewordenen kleinen Schrift (8) behandelt, über die ich in PETERMANN'S Mitteilungen berichtet habe (10). Er betrachtet nacheinander die drei Voraussetzungen, daß die Erde völlig starr, völlig flüssig oder zähflüssig sei. Im ersten Falle, wo also der Äquatorwulst der Erde seine Stelle dauernd behält, können die Pole nur die kleinen Bahnen beschreiben, die man als den EULER'schen Kreis bezeichnet. Im zweiten müssen sie relativ schnell weite Ausschläge vollführen. Im dritten Falle, der für uns der wichtigste ist, paßt sich die Figur der Erde langsam der neuen Lage der Trägheits- und Rotationspole an, und die Pole führen Bewegungen von großer Langsamkeit, aber unbeschränkter Ausdehnung aus.

Mit Änderung der Lage der Pole ändert sich natürlich auch die Richtung der Polfluchtkraft und der Westtritt der Kontinentalblöcke. Umgekehrt liegt es nahe genug, in der Ortsveränderung der letzteren die Ursache der Verlagerungen der Pole zu suchen, die ja eine Folge von Verlegungen der Trägheitsachse der Erde sein müssen. Bis jetzt hat die Rechnung (7) Prof. SCHWEYDARS allerdings viel zu geringe Polverschiebungen als Folge der möglichen Kontinentenverschiebung ergeben; es scheint indessen, daß auch eine andere Betrachtungsweise möglich ist, und so bleibt die Hoffnung bestehen, daß der große Zusammenhang, der sich dem ahnenden Auge darstellt, mit der Zeit auch sich der exakten Rechnung bestätigen wird.

Vorläufig genügt es, daß die Möglichkeit und die Gesetze aller dieser Bewegungen aufgedeckt sind.

Daß wegen der Abplattung der Erde jede Polverschiebung epirogenetische Bewegungen zur Folge haben muß, ist bereits öfter hervorgehoben worden (11). Das Wasser muß sich der neuen Lage schnell, das Innere der Erde aber langsam anpassen. Das ergibt bei jedem Ruck der Pole Transgressionen auf der Seite der abnehmenden, Regres-

sionen auf der der wachsenden Breiten, in jeder Pause umgekehrt durch das Nachhinken des Erdinnern Transgressionen vor den Polen, Regressionen hinter ihnen. Es ist wahrscheinlich, daß ein Teil von dem ewigen Wechsel in diesen Dingen, den die Geologie uns enthüllt hat, hierin seine Erklärung findet. Für den vorwiegenden Charakter ganzer Formationen in Deutschland hat dies A. WEGENER bereits auf S. 124 seines Buches gezeigt. Über einen neuen interessanten Zug im Bilde dieser Wirkungen verdanke ich ihm die folgenden Bemerkungen:

»Nehmen wir diesen Zusammenhang als erwiesen an, so folgt daraus, daß die Oberfläche der festen Erde bei schnelleren Polwanderungen vor dem Pol bis zu einigen Hundert Metern über, hinter ihm bis zu einigen Hundert Metern unter ihrer Gleichgewichtslage liegen kann. Das größte Gefälle (Größenordnung $\frac{1}{2}$ km pro Erdquadrant) würde im Meridian der Polverschiebung an dessen Schnittpunkten mit dem Äquator herrschen, ein fast ebenso großes auch an den beiden Polen. Hierdurch werden Kräfte frei, welche die Massen von den zu hohen nach den zu tiefen Gebieten hinziehen, und diese Kräfte sind ein vielfaches der normalen Polfluchtkraft, die bei Kontinentalschollen ja nur einem Gefälle von 10—20 m pro Erdquadrant entspricht. Freilich greifen diese Kräfte nicht nur an den Kontinentalschollen, sondern auch an dem darunter liegenden Sima an, welches vielleicht leichtflüssiger ist und unter der starrereren Kruste hinweg den Ausgleich vollzieht.

Allein solange das Gefälle besteht — und die Trans- und Regressionen legen von seiner Existenz Zeugnis ab — muß auch auf die Kontinentalschollen diese Kraft wirken, und muß damit auch Verschiebungen und Faltungen derselben bewirken können, wenn auch diese Bewegungen möglicherweise geringer sind als die entsprechenden Bewegungen des flüssigen Materials unter ihnen. Falls sich der Verdacht bestätigen sollte, daß die normale Polfluchtkraft nicht ausreicht, um die großen äquatorialen Gebirgsfaltungen zu erklären, glaube ich, daß wir in diesen nachhinkenden Ausgleichen bei Polwanderungen eine Kraftquelle haben, welche unter allen Umständen ausreicht, um die Faltungsarbeit zu leisten. Besonders wahrscheinlich wird diese Deutung durch den Umstand, daß die beiden größten äquatorialen Faltsysteme, das karbonische und das tertiäre, gerade in denjenigen Zeiten entstanden sind, in welchen wir aus anderen Gründen besonders schnelle und ausgiebige Polwanderungen annehmen (Wanderung des Südpols vom Altkarbon bis Perm, von Mittelafrika bis Australien in der damaligen Lage; Wanderung des Nordpols vom Alt-Tertiär bis Quartär, von der Beringstraße bis Grönland).«

Außer diesen Strömungen des Sima zu den Quadranten der abnehmenden Breiten muß die Abplattung der Erde bei Polwanderung noch eine andere Wirkung haben, nämlich Zerrungen der Kruste quer zum Meridian bei der Annäherung zum neuen Äquator. Von der Polflucht der Kontinente, die sie unterstützen können, unterscheiden sich

die Strömungen dadurch, daß sie nur nach Änderungen der Pollage vorkommen, während die Polflucht auch ohne diese fortwährend wirken muß.

Eine Übersicht über die Richtung und den Ort der stärksten Wirkung der oben geschilderten Kräfte gibt die folgende Tabelle.

Durch die Kräfte erzeugte Bewegungen.

	Richtung	Polfluchtkraft	Westtrifkraft
I. Bewegungen der Scholle relativ zu andern Schollen bzw. () in der Scholle.	a. Auseinander (Dehnung)	Max. in 90° Br.	—
	b. Zueinander (Stauung)	Max. in 0° Br.	—
II. Bewegungen der Scholle rel. zum Sima bzw. () zu im Sima verharrenden Schollen.	a. Zerrung (Ab- lösung)	polarer Rand	Ost- rand } Max. in 0° Br. West- rand }
	b. Stauung (An- gliederung?)	äquat. Rand	
III. Drehung der längeren Achse, von der Schollen- mitte gesehen.		Achse NO-SW	Achse NW-SO
	a. nach rechts	0-45° Br.	45-90° Br.
	b. nach links	45-90° Br.	0-45° Br.
			Aus NS in OW Stellung
			in Nordbreite
			in Südbreite.

Die Emporfaltung von Gebirgen (Stauung, Zusammenschub) geschieht offenbar nicht nur durch Pressung der Schollen gegeneinander, sondern auch durch solche der Schollen gegen besonders starr gewordenes Sima. Die Kordilleren am Westrande Amerikas sind das großartigste Beispiel davon (12). Andererseits ist die Bildung der Inselgirlanden an der Ostseite Asiens und Amerikas nach WEGENERS Anschauung ein Beispiel des Steckenbleibens kleinerer Schollen im Sima beim Fortschreiten der größeren. Die Tabelle enthält darum nicht nur die Bewegungen der Schollen gegeneinander, sondern unter II auch diejenigen gegen das Sima. Da ferner die Abhängigkeit dieser Kräfte von der geographischen Breite auch notwendig Drehungen bei größeren Schollen bewirken muß, so füge ich den Sinn hinzu, den diese Drehung bei langgestreckten Schollen je nach der Länge ihrer längsten Achse haben muß.

Die Trennung oder Zusammenschiebung der Schollen hängt außerdem, und bei der Westtrift allein, von deren verschiedener Verankerung im Sima ab.

Literatur.

1. A. WEGENER, Hamburg, Die Entstehung der Kontinente. PETERM. Mitteil. 1912. In der 2. Auflage seines Buches: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (Braunschweig. 1920) ist die Polfluchtkraft bereits kurz erläutert.
2. Verh. d. 17. allg. Konferenz der internat. Erdmessung. 1912, S. 111.
3. PETERM. Mitteil. 1921, S. 149. — Meteorolog. Zeitschr. 1921, S. 100. — Geografiska Annaler. 1920, S. 294.

4. PAUL S. EPSTEIN, Leiden, Über die Polflucht der Kontinente. Die Naturwissenschaften. 1921, S. 499.
5. W. SCHWEYDAR, Potsdam, Bemerkungen zu WEGENERS Hypothese der Verschiebung der Kontinente. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde in Berlin. 1921. S. 120.
6. W. D. LAMBERT, U. S. Coast & Geod. Survey, Some mechanical curiosities, connected with the earth's field of force. Amer. Journal of Science, Sept. 1921, S. 129.
7. SCHWEYDAR a. a. O.
8. SCHIAPARELLI, De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques. St. Petersburg 1889.
9. SCHWEYDAR a. a. O.
10. PETERM. Mitteil. 1921, S. 145 (mit Figuren).
11. REIBISCH, Ein Gestaltungsprinzip der Erde. 27. Jahresber. d. Ver. f. Erdk. zu Dresden, S. 105—124. 1901.
 KREICHGAUER, Die Äquatorfrage in der Geologie. Steyl 1902.
 SEMPER, Das paläothermale Problem, speziell die klimatischen Verhältnisse des Eozän in Europa und im Polargebiet. Zeitschr. Geol. Ges. 48, 261. 1896.
 W. KÖPPEN, Ursachen und Wirkungen der Kontinentalverschiebungen und Polwanderungen. PETERM. Mitteil. 1921. S. 192—193.
 A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (2. Aufl.). Braunschweig. 1920, S. 124.
12. A. WEGENER am letztgen. Orte, S. 35, 52.

Die Bedeutung der geologischen Erforschung des Südrandes der Puna de Atacama für die Geschichte der Anden und die Gebirgsbildung im allgemeinen.

Von H. Gerth.

(Mit 2 Textfiguren.)

Das Problem der Gebirgsbildung ist eines der am heißesten umstrittenen, vielleicht aber auch das wesentlichste der Geologie. Auch hier haben wir wieder einmal die in der Entwicklung unseres Wissens nicht seltene Erscheinung, daß wir nach jahrzehntelanger Forschung scheinbar wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren; aber der neue Standpunkt liegt auf einem erheblich höheren Niveau unserer allgemeinen Erkenntnis, so daß wir doch mit Befriedigung auf den langen Weg zurücksehen können, selbst wenn es ein Irrweg war. Vor etwa 100 Jahren wurde die Lehre der Aktivisten, die im Vulkanismus die treibende Kraft aller Bewegungsvorgänge in der festen Erdkruste sahen, abgelöst durch die Kontraktionstheorie. Heute, nachdem sich namentlich die Ergebnisse der neueren geophysikalischen Forschung über die Beschaffenheit des Erdinnern kaum noch mit der Kontraktionstheorie vereinbaren lassen, mehren sich wieder die Stimmen, die die großen Bewegungsvorgänge in der festen Erdkruste letzten Endes auf magmatische Vorgänge zurückführen wollen. Zu solchen Vorstellungen wird auch