



Geologische Bundesanstalt
Bibliothek

24.263, 8²

R. Schwinner 24263 8²

Überreicht vom Verfasser

Beiträge zur Geophysik“, Bd. 43, Heft 3, 1934

Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. in Leipzig

Sind große Polverschiebungen möglich?

Von

Robert Schwinner

Graz

(Mit 2 Figuren)



Geol.B.-A. Wien



0

000001

117325

Zusammenfassung: Entgegen den von Geophysikern sonst geäußerten Ansichten hat vor kurzem MILANKOVITCH eine Polverschiebung abgeleitet, welche den Nordpol in geologischer Vergangenheit von den Hawai-Inseln quer durch Alaska zu seiner gegenwärtigen Lage und künftig weiter gegen die Petschora-Mündung führen sollte. Seine erste Darstellung (in „Handbuch der Geophysik“) ist abzulehnen; sie verstößt gegen den Energiesatz. Eine Ableitung, die er später gegeben hat, ist formell einwandfrei. Aber die Voraussetzungen — Unveränderlichkeit der Sialkugelschale, alleinige Wirkung der „Polfluchtkraft“ usw. — wird der Geologe ablehnen. Es muß dabei bleiben: für große Polverschiebungen ist eine zureichende physikalische Begründung auch damit noch nicht gegeben worden.

Summary: In contradiction to the opinion expressed by other geophysicists, MILANKOVITCH has deduced a shifting of the Earth's axis, that was to lead the north-pole during the geologic ages from the Sandwich-Islands across Alaska to its present position and in the future still farther to the mouth of the Petchora. His first statement (in the „Handbuch der Geophysik“) is to be rejected. It commits a mistake against the doctrine of the conservation of energy. Later he has given a deduction that cannot be formally objected. But the suppositions (invariability of the „Sial“ as a spherical shell, the exclusive result of the „Polfluchtkraft“ and so on) must be rejected by the geologist. Things remain as they were before: even nowadays no conclusive motivation by physical arguments has been given for such considerable deviations of the pole.

Die Vorstellung, daß die Rotationsachse der Erde sich im Erdkörper um beträchtliche Beträge verschoben hätte oder künftig verschieben würde, ist physikalisch nicht leicht zu fundieren und hat darum bei den Geophysikern nicht viel Anklang gefunden, auch die Geologen sind mit der Annahme von „Polwanderungen“ schon vorsichtiger geworden. Neuestens hat nun MILANKOVITCH¹⁾ die rechne-

¹⁾ M. MILANKOVITCH, Säkulare Polverlagerungen. Handbuch d. Geophysik, herausg. von GUTENBERG. Berlin 1933. I, Liefg. 2, Abschn. VII, S. 438—500 (abgeschlossen März 1932). — Derselbe, Das Problem der Verlagerungen der Drehpole der Erde in den exakten und in den beschreibenden Naturwissenschaften. Erinnerungen an Alfred Wegener. Publ. mathematiques de l'université de Belgrade 2 (1933) 166—188.

rische Behandlung dieses Problems wieder aufgenommen und sich daraufhin über die Möglichkeit großer Polverschiebungen wesentlich günstiger ausgesprochen als seine Vorgänger unter den Geophysikern (u. a. G. H. DARWIN, SCHIAPARELLI, TISSERAND, KLEIN u. SOMMERFELD usw.). Es ist aber vielleicht gut, seine gewiß sehr interessanten Ausführungen vor einem hauptsächlich geophysikalisch orientierten Forum zur Diskussion zu stellen, bevor die „Wanderung“ beginnt, nicht die des Poles, sondern die seiner Hypothese durch die Hand- und Lehrbücher bis zu den populären Schriften, und bevor sich bei den Laien die lapidare Einleitung einbürgert: „Wie die Berechnungen von MILANKOVITCH bewiesen haben . . .“ Bei den Fachgenossen von der Geologie weiß man nie, was hinter einer solchen Einleitung kommen kann, aber man muß auf manches gefaßt sein. Daher: Principiis obsta!

Die erste Darstellung, welche MILANKOVITCH (im Handbuch der Geophysik) gegeben hat, ist wegen der unnötig vielen¹⁾ Rechnungen schwer zu übersehen. Der Kern des Gedankenganges ist folgender:

Für die mathematische Deduktion von MILANKOVITCH wird die Erde in zwei Teile zerlegt, in die dünne Sialdecke und dann alles, was tiefer liegt und was nach der unmittelbaren Unterlage des Sial kurz mit Sima bezeichnet werden möge. Die Sialdecke wird als fest und geschlossen angesehen — nicht bloß über die Kontinente, sondern auch, wenigstens zum großen Teil, über die Ozeanböden —, so daß sie ihre Form und Massenverteilung unverändert behauptet, mit der einzigen Einschränkung, daß sie imstande sein soll, einem eventuellen Wechsel in der Krümmung der Simaunterlage biegsam und vollständig

¹⁾ Beispielsweise ebendort S. 491—497, § 158: „Die säkulare Wanderung der Rotationspole der Erde“. Die Bewegung des Rotationspoles wird mit allen Schikanen als vektorielle Differentialgleichung angesetzt, die in 4 skalare Differentialgleichungen zerfällt und diese integriert. Daraus ergibt sich hauptsächlich, daß wegen der Anpassung des fluidalen Sima der Momentandrehpol statt des EULERSCHEN Kreises eine sich asymptotisch verengende Spirale um den Trägheitspol der Erde beschreibt. Dann heißt es: „Diese Bewegung, weil sie das Bestreben hat, stets auszuklingen, ist bei der säkularen Bewegung des Rotationspoles nicht zu berücksichtigen“ (S. 497). Die ganze schöne Rechnung war also in diesem § 158 rein überflüssig, dieser soll ja laut Überschrift von der „Säkularen Wanderung“ handeln. Nicht zu billigen ist, daß S. 497 (Formel 943) als Ergebnis dieser Rechnung herauszukommen scheint, was offenbar S. 493 (Formel 903) genau so als Prämisse hineingesteckt worden ist. Es ist vielleicht nicht überflüssig, für Fernerstehende zu betonen, daß mit diesem Umweg nichts gewonnen wird, es bleibt eine Annahme, für welche nur die kurze Begründung (S. 493) gegeben ist.

anschmiegend zu folgen. Letzteres kann unbedenklich angenommen werden. Die Krümmung des Erdsphäroides ist überhaupt gering, und die Verbiegungen, die im Simakern bei den Anpassungen an verschiedene Pollagen vorkommen, sind von jener erst ein kleiner Bruchteil. Auf den ersten Teil der Annahme müssen wir noch zurückkommen, hier muß man sie als notwendige Voraussetzung des weiteren Gedankenganges akzeptieren. Das Sima dagegen sei „fluidal“, d. h. gegenüber lang andauernder, wenn auch ganz kleiner Beanspruchung vollkommen nachgiebig. Daher kann bei der Rotation seine Gleichgewichtsfigur nur die einer idealen Flüssigkeit sein, das Rotationsellipsoid, sich drehend um die Achse seines größten Trägheitsmomentes C .

Es wird nun angenommen, daß die spezifisch leichtere Sialdecke auf dem Sima in vollkommenem isostatischen Gleichgewicht flottiere. Denkt man also die Sialmassen auf die größere Dichte des Sima komprimiert, so bekäme man das vorerwähnte glatte Rotationsellipsoid, das „innere Referenzellipsoid“, und die kleine Achse, um die es sich drehen würde, ist die Figurenachse des Sima F ; ihr nördlicher Durchstoßpunkt auf der Erdoberfläche heiße der „Referenzpol“ (ebenfalls als F zu bezeichnen). Denkt man nun jene Kondensation wieder rückgängig gemacht, so bedeutet das, daß gewisse Massen weiter hinaus, also von der Drehachse weggeschoben werden, es kommt zu dem Trägheitsmoment, welches das ideale „innere Referenzellipsoid“ des Sima hatte, ein gewisser Betrag hinzu, den wir vereinfachend das Trägheitsmoment der Sialdecke nennen wollen. Man kann das so auffassen, als ob zwei Trägheitsellipsoide ineinandergeschachtelt und gekoppelt wären, deren Hauptachsen im allgemeinen nicht zusammenfallen. (Nach der Angabe in der späteren Arbeit von MILANKOVITCH soll die kleine Achse des Trägheitsellipsoides, welches den Einfluß der unregelmäßigen Massenverteilung der heutigen Kontinente und Ozeane repräsentiert, am Nordrand von Eurasien, etwa bei der Petschoramündung liegen, was ganz plausibel erscheint.) Der Trägheitspol des Ganzen, des gekoppelten Sial + Sima, muß nun zwischen den C -Achsen beider liegen. Aber weil die Masse des Sial nur einen kleinen Bruchteil der ganzen Erde vorstellt, kommt es darauf hinaus, daß durch die Unregelmäßigkeit der Massenverteilung im Sial der Trägheitspol des Ganzen T um ein kleines Stück vom Trägheitspol des Simakernes, für sich allein betrachtet, von F entfernt wird. MILANKOVITCH schätzt diese Distanz, „die Anomalie des Trägheitspoles“, heute auf $1'$, und mehr als $4'$ könnte sie überhaupt kaum bei einer denkbaren

Konfiguration der Kontinente erreichen, was wieder ganz plausibel erscheint. Wie bekannt, beschreibt nun weiter der Momentandrehpol der Erde P um den Trägheitspol T den EULER-CHANDLERSchen Umlauf. Dabei kommen P und T höchstens wenige Zehntel Bogensekunden auseinander, und weil der Umlauf nur rund 14 Monate dauert, hat dieser Vorgang für die säkulare Bewegung der Pole keine Bedeutung. In bezug auf diese betrachtet, kann der Trägheitspol T auch als die Mittellage des Drehpoles der Erde angesehen werden.

Die unregelmäßige Massenverteilung im Sial bringt es also mit sich, daß der Simakern der Erde um eine Achse (T) rotieren muß, welche mit seiner Figuren- und Hauptträgheitsachse (F) nicht zusammenfällt. Ein solcher Zustand kann bei der angenommenen „fluidalen“ Nachgiebigkeit des Sima nicht andauern. Rotiert ein Körper dieser Art, dessen Begrenzung eine jener Figurenachse entsprechende Gleichgewichtsfigur gewesen ist, später einmal um eine andere Achse, so ergeben sich Deformationskräfte¹⁾, welche seine Figur „anzupassen“ streben, derart, daß die Figurenachse des deformierten fluidalen Körpers wieder mit der Drehachse zusammenfallen würde. Es wird also — nach den gemachten Voraussetzungen — der Simakörper sich deformieren und dabei seine Figurenachse F der Mittellage der Drehachse nähern. Nehmen wir an, nach einer gewissen Zeit — sie mag wegen der Viskosität des Sima trotz des kleinen ursprünglichen Abstandes lange währen — wäre der Referenzpol F genau im Ort T . Dann wird der Trägheitspol nicht mehr in T sein; denn zu den Trägheitsmomenten des „inneren Referenzellipsoides“ des Sima, dessen (gewanderter) Figurenpol F_1 nunmehr im Ort T liegt, addieren sich wieder die Momente der unregelmäßigen Sialdecke, die bei der kleinen Veränderung ihrer Lage zur Drehachse, und den bei dieser (etwa homogenen) Deformation des ganzen Erdkörpers sich vielleicht ergebenden kleinen relativen Verschiebungen zwischen Kern und Decke, nur wenig anders sein können als in der oben betrachteten Ausgangslage. Der neue Trägheitspol der Konfiguration Sial + Sima liegt daher nunmehr in T_1 , im Abstand a_1 vom neuen Referenzpol $F_1(T)$, (S. 497), wobei die Abstände $a = \overline{FT}$ und $a_1 = \overline{F_1T_1} = \overline{TT_1}$ sich nur um Beträge nied-

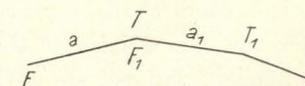


Fig. 1.

¹⁾ Es wäre zu erwähnen, daß diesen Deformationskräften R. SPITALER ein besonderes Studium gewidmet hat und dabei auch die dort reproduzierten Formeln abgeleitet hatte.

rigerer Größenordnung unterscheiden. Mit anderen Worten, der Referenzpol (Figurenpol des Simakernes) läuft dem Trägheitspol der ganzen Erde bzw. dem mittleren Drehpol nach, in ganz kurzem Abstand, kann ihn aber nicht erreichen — etwa wie in dem bekannten Sophistenschwank Achilles hinter der Schildkröte herläuft! Erst wenn die Achse jene Lage erreicht hat, für welche das Sial allein genommen das größte zusätzliche Trägheitsmoment liefert, können alle 3 Pole zusammenfallen und die Polwanderung würde ein Ende haben, ganz gleich ob der Weg dorthin kurz ist oder über einen Meridianquadranten geht¹⁾.

Schält man den Gedankengang derart kurz und geschlossen aus den mehr als 30 Seiten des Handbuches der Geophysik heraus, so erkennt man, daß er nicht richtig sein kann. Wenn ein Drehpol „wandern“ soll, so macht das mancherlei Umstände, z. B. daß dabei jedes, ausnahmslos jedes Massenteilchen der Erde Richtung und Größe seiner Geschwindigkeit ändern muß. Von dem hierfür nötigen Energieaufwand kann man sich etwa, wie folgt, elementar ein Bild machen: Man denke, wie gebräuchlich, die Drehung als Vektor dargestellt, als eine gerichtete Strecke, in der Richtung der Drehachse und an Länge proportional der Drehgeschwindigkeit, so kann man verschiedene Drehungen eines Körpers um einander kreuzende Achsen nach dem Parallelogramm zusammensetzen (wie sonst die Kräfte usw.). Bedeutet derart \vec{OP} die augenblickliche Rotation der Erde um die Achse OP , und soll z. B. eine Verschwenkung der Drehachse um 60° erzielt werden, d. h. daß die Rotation mit gleicher Geschwindigkeit um die Achse OP_1 vor sich gehe, so sagt das Vektoren-Parallelogramm, daß zu diesem Zweck eine zusätzliche Rotation erzeugt werden muß um die Achse OQ , die 60° über OP_1 hinausliegt, mit der gleichen Drehgeschwindigkeit wie die ursprüngliche: als Resultierende von \vec{OP} und \vec{OQ} ergibt sich dann die gewünschte Drehung \vec{OP}_1 . Um das zu erzielen, ist also eine Energiemenge nötig genau so groß wie die lebendige Kraft, die in der heutigen Erddrehung repräsentiert ist. Das ist $2.17 \cdot 10^{36}$ Erg. Diese Ziffer von astronomischer Größenordnung können wir dadurch veranschaulichen, daß wir sie auf die einzelnen Quadern des Erdgebäudes aufteilen. Das Volumen der Erde ist $1.083 \cdot 10^{27}$ cm³, da kommt auf 1 cm³: $2 \cdot 10^9$ Erg, also auf 1 dm³, einen Würfel wie die gewöhnlichen

¹⁾ Es ist leicht einzusehen, daß mehr als 90° dieser Weg keinesfalls betragen kann. Aber nach den von MILANKOVITCH in einer späteren Arbeit gegebenen Mitteilungen soll der Weg des Poles sein: Hawaii-Inseln—Petschora-Mündung, also kaum viel darunter.

Pflastersteine, rund 20400 Meterkilogramm. Ist der Betrag der Polverschiebung kleiner als 60° , so ist der Energiebedarf, wie leicht zu berechnen, entsprechend geringer. Aber für Polverschiebungen von geologisch einigermaßen erklecklichem Betrag ist von der Größenordnung nichts abzuhandeln.

Die auf vorstehendes bezüglichen Sorgen wären überflüssig, wenn man die Bewegungsgleichungen streng und unverkürzt angesetzt hätte; denn dann wäre in diesen der Energiesatz implizit enthalten. Das dürfte im vorliegenden Fall große Schwierigkeiten haben. Jedenfalls hat MILANKOVITCH die einzelnen Etappen seines Gedankenganges gesondert der rechnerischen Behandlung unterzogen. Den Übergang zwischen diesen einzelnen Paragraphen vermitteln nur gewisse allgemeinere Raisonnements. Da muß es als wesentlicher Mangel bezeichnet werden, daß nicht zum Schluß nachgeprüft wurde, ob die Energiebilanz des gedachten Vorganges überhaupt möglich erscheint. Soweit die Daten vorliegen, ist das zu bezweifeln.

Nach den Voraussetzungen würde F , die Figurenachse des inneren Referenzellipsoids des Simas, also die Achse, um welche jenes stabil rotieren könnte, und die Mittellage der Drehachse der Erde (T) nur um 1' auseinandergehen. Aus diesem System kann die Energie für eine Polverschiebung von mehr als eine Bogenminute nicht kommen. Die Sialkruste repräsentiert wohl eine gewisse Energie der Lage dadurch, daß ihre Hauptträgheitsachsen von der Momentandrehachse, um die sie heute zu rotieren gezwungen ist, beträchtlich abweichen. Aber die Masse des Sials ist gering, und der Unterschied seiner Hauptträgheitsmomente auch — im Verhältnis zum Kern natürlich; wir haben ja oben erwähnt, daß dadurch — statisch ausgewogen — die Trägheitsachse des Ganzen (Sial—Siam) von der des Simas, für sich allein betrachtet, nur um 1' verschwenkt wird. Von ähnlicher Größenordnung sollte wohl auch die Polverschiebung sein, welche die darin repräsentierte Rotationsenergie im Simakern höchstens zuwege bringen kann.

In der später (1933) in Belgrad erschienenen Abhandlung nimmt MILANKOVITCH einen ganz anderen Standpunkt ein, ohne eine Erklärung darüber hinzuzufügen¹⁾. In der älteren Darstellung (im Hand-

¹⁾ Die genannte kleine Abhandlung bringt auf S. 177—180 eine neue Ableitung für die sog. „Polfluchtkraft“, und zwar wird diese dort (S. 180, Formel 11) gefunden zu

$$dH = z_0 (g_p - g_a) \sin 2\varphi \cdot d\mu / 2r,$$

dagegen hatte sich im Handbuch der Geophysik (S. 474, Formel 823) ergeben

buch der Geophysik) war von einer relativen Verschiebung der Sialkruste wenig die Rede, und was dort damit gemeint war, sind jene Verschiebungen, welche sich aus der ungefähr homogenen und kleinen Deformation des sich anpassenden Kernes ergeben, und sie werden ausdrücklich als „sehr klein“ bezeichnet (S. 486), was in diesem Zusammenhang gewiß richtig ist. In der späteren Arbeit (Belgrad 1933) ist (S. 181) an die Spitze der Deduktion die Frage gestellt, „ob die Polfluchtkräfte die Sialdecke der Erde, als Ganzes betrachtet, gegen ihre Unterlage verschieben können“. Dagegen ist hier von einer Veränderlichkeit des Referenzpoles und der sich daraus ergebenden „Anpassung“ der Form des Simakernes — die im Handbuch eine große Rolle spielen — nicht mehr die Rede. Es wird anscheinend stillschweigend angenommen, daß die Drehachse sowohl im Raum als auch im Simakern ungeändert ihre Lage beibehält — was ja nicht streng, aber in großer Annäherung wohl gelten kann — und nur „die auf ihrer Unterlage schwimmende Sialdecke“ (S. 186) verschiebt sich relativ zum Simakern und zu seiner Dreh-(Figuren-)Achse, was umgekehrt, wenn man den Standpunkt auf der Sialdecke einnimmt, als Verschiebung des Drehpoles, des Durchstoßpunktes jener Drehachse an der Oberfläche, auf der Erdoberfläche angesehen werden kann.

Diese Darstellung ist in sich ohne Widerspruch. Kann die feste Sialhaut auf dem Sima gleiten wie auf einer Flüssigkeit, d. h. so, daß für dieselbe Polfluchtkraft

$$P_1 = z_0 (g_p - g_a) \sin 2\varphi \cdot \mu/r.$$

Das war damals also der doppelte Betrag. Wenn MILANKOVITCH S. 181 schreibt: „Die Polfluchtkraft . . . kann . . . wie im erwähnten Abschnitt des GUTENBERG'schen Handbuches gezeigt, etwa den sechsfachen Wert der fluterzeugenden Kraft von Sonne und Mond erreichen“, so ist das ein Mißverständnis. Dort steht nämlich (S. 476, ganz oben): „ . . . daß der maximale Wert der Polflucht kraft 12.7 mal größer ist als jener der fluterzeugenden.“ Außerdem: richtig ist die Formel von 1932! Die neue Ableitung von 1933 beginnt damit (S. 180, Formel 7), das Schwerepotential anzusetzen

$$W = \frac{fM}{r} + \frac{n^2 r^2}{2} \cos^2 \varphi.$$

Das ist keinesfalls „genügend genau“, denn daraus wird gefolgert Formel 9:

$$g_p - g_a = n^2 r,$$

während es richtig heißen muß (CLAIRAUT'sches Theorem):

$$\frac{a-c}{a} + \frac{g_p - g_a}{g_a} = \frac{5}{2} \cdot \frac{n^2 r}{g_a},$$

woraus sich dann der Fehler der 1933 neu aufgestellten Formel für die Polflucht kraft vollständig erklärt.

mit kleinerer Geschwindigkeit auch die Reibungswiderstände klein werden und dauernde, wenn auch kleinste Beanspruchung mit der Zeit beliebig große Verschiebungen erzielen kann, so wird sie es nicht vertragen, mit ihren Hauptträgheitsachsen schief zur Drehachse liegen zu bleiben. Sie muß den Deviationsmomenten nachgeben und gleiten, bis sie eine stabile Lage — Achse größten oder kleinsten Trägheitsmomentes in der Drehachse — erreicht hat. Auch das Ergebnis der Berechnung von MILANKOVITCH, daß diese Verschiebung des Poles längs einer schlichten Trajektorie, sozusagen längs einer Fallinie, vor sich gehen würde, ist bei der starken Dämpfung, welche die Bewegung jedenfalls erleidet, durchaus plausibel. — Wohlverstanden: immer nur so lange, als die Voraussetzungen und Grundlagen der Rechnung als gültig angesehen werden können: ideale feste — unveränderliche — Kruste auf ideal fluidaler Unterlage.

Nunmehr ist aber zu fragen, ob diese Voraussetzungen zureichend zutreffen und ob der theoretisch gewiß denkbare Vorgang auf der Erde Verwirklichung finden kann. Bedenken erregt jedenfalls, daß die Sialhaut als feste unveränderliche Kugelschale angesehen wird. Nicht etwa deswegen, weil das Sial — die Bezeichnung diesmal petrographisch verstanden — vermutlich die Erde nicht geschlossen umhülle, sondern im Stillen Ozean ein großes und vielleicht noch verschiedene andere kleinere Löcher habe. Unmittelbar unter der kalten Tiefsee muß auch das an sie herantretende basische Sima in einer nicht unbedeutenden Mächtigkeit erstarrt und so wohl imstande sein, „die Kontinentalschollen gegeneinander abzustützen“ (a. a. O. S. 181). Es ist ein anderes Moment im Verhalten der Erdkruste, das nicht entsprechend berücksichtigt scheint. Gegen Beanspruchung durch Druck beweist das Gesteinsmaterial große rückwirkende Festigkeit, und wenn im großen die rückwirkende Festigkeit vielleicht etwas geringer ist (z. B. wegen vorgängiger Ausarbeitung von Diagonalscherflächen), ganz gering wird sie auch da nicht einzuschätzen sein. Die Zugfestigkeit ist schon im Einzelmineral und im Gesteinshandstück geringer, in der Gebirgsmasse, die stets durch Klüfte und Lassen zerschnitten ist, kann sie ungefähr gleich Null angesehen werden. Die Beanspruchungen sowohl durch die Polflucht kraft als auch durch die von der Polverschiebung geweckten Deformationskräfte (s. oben) wirken sich nur in bestimmten Gebieten als Druck, in anderen als Zug aus. Außerdem ist zu bedenken, daß nur eine Kugelschale glatt gleiten könnte; eine Schale, die auf einem Ellipsoid gleitet, muß da im allgemeinen zusammengeschoben, dort gezerrt werden. In den Druck-

gebieten werden sich nun die Schollen, wenn auch voneinander getrennt, gegeneinander abstützen und im ganzen derart reagieren, daß mit einer gewissen Annäherung diese Flecken als fest und unveränderlich in die Rechnung eingestellt werden können. In den Zerrungsgebieten werden aber die Klüfte und Lassen ohne Widerstand aufklaffen. Damit verliert aber die Berechnung der Polbahn, für welche MILANKOVITCH (S. 184) klaglose Summierung „über die gesamte Sialbedeckung“ voraussetzt, ihre Grundlage. Und wenn die Sialschollen sich einmal und in gewissen Gruppen bündeln, anderswo aber trennen, verliert überhaupt der Begriff Polverschiebung, bezogen auf die Erdkruste, völlig seine Definition. Mit der Simamasse, dem weit an Masse überwiegenden Kern der Erde, hat die Drehachse natürlich streng bestimmte Beziehungen, aber diese sind unserer unmittelbaren Beobachtung nicht zugänglich. Für die Erdkruste jedoch dürfte ein mathematisch geschlossenes Bild nicht zu finden sein, sie zerfällt unter dem Einfluß der vielerlei an ihr angreifenden Kräfte in eine unübersehbare Zahl von Schollen, welche hin- und hertreiben wie das Packeis des Nordmeeres¹⁾, hier sich stauen und pressen, dort auseinanderziehend Waken freigeben — nach Laune von Wind, Welle und Strom.

Immerhin, auch in derartigem Packeismilieu können große verhältnismäßig einheitliche Driften zur Ausbildung kommen. Für die Sialschollen im besonderen wäre solches zu erwarten, wenn ihre Bewegung hauptsächlich oder doch zu einem großen Teile durch Kräftesysteme bestimmt würde, die symmetrisch zur Drehachse orientiert wären, wie man sie unter dem Namen „Polfluchtkraft“ angenommen hat, welche auch MILANKOVITCH in erster Linie zur Erklärung heranzieht. Um diese Möglichkeit zu untersuchen, wird es gut sein, für diese vielberufene „Polfluchtkraft“ eine einfache und durchsichtige Ableitung zu geben, für welche vielleicht auch sonst Bedarf vorliegt²⁾.

¹⁾ Daß die einzelnen Krustenschollen derart ungeordnete Bewegungen gegeneinander und gegen die Drehachse unter Einfluß der EULERSchen Nutation und der Gezeiten in einem Maße ausführen, daß sie von der Genauigkeit der modernen astronomisch-geodätischen Messungen erfaßt werden können, hat R. SCHUMANN gezeigt. Vgl. R. SCHUMANN, *Astronomisch-geodätische Beiträge zur Geologie. Mitt. Geol. Ges. Wien* 18 (1925) 29. — Derselbe, *Über Erdschollenbewegung und Polhöenschwankung. Astr. Nachr. (Nr. 5442) 227* (1926) 292—302. — Derselbe, *Über Zusammenhänge zwischen Polhöenschwankung, Beweglichkeit des Erdkörpers und Mondbewegung. Gerl. Beitr. Geophys.* 19 (1928) 305—317.

²⁾ Auch die von MILANKOVITCH (Handbuch, S. 472ff.) dann auf zwei Seiten gegebene Ableitung ist nicht gerade sehr einfach.

Voraussetzung, daß in der Erdkruste eine derartige „Fluchtkraft“ auftrete, ist zweierlei: daß an einem bestimmten Orte der Erdoberfläche die Äquipotentialflächen der Schwere divergieren, und daß irgend ein Mechanismus den Schwerpunkt einer beweglichen Masse immer in gleichem Abstand über einer dieser Niveaulflächen hält. Nebenstehende Figur zeichnet den einfachsten derartigen Mechanismus, eine auf der betreffenden Niveaulfläche rollende Kugel; — wie leicht einzusehen, ist ein Eisberg oder eine isostatisch flottierende Sialscholle ebenfalls dafür geeignet.

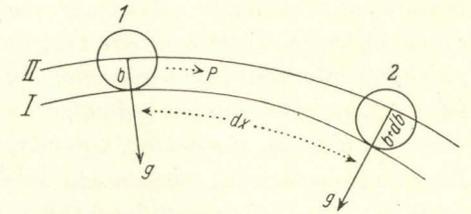


Fig. 2.

Eine Kugel von der Masse m rolle also auf der Niveaulfläche I und ihr Schwerpunkt liege um die Strecke b über dieser, also im Anfangspunkt 1 auf der Niveaulfläche II . Kommt die Kugel nach einer horizontalen Verschiebung um die Strecke dx im Ort 2 an, so ist der Abstand der Niveaulfläche II von I auf $b + db$ gewachsen, der Schwerpunkt der Kugel, der unverändert um b über I liegen muß, ist gegenüber seinem Ausgangsniveau II um db gesunken, oder die Schwere g hat bei diesem Vorgang die Arbeit geleistet $m \cdot g \cdot db$.

Soll dafür eine in der Waagerechten wirksame Kraft supponiert werden, so ist dafür die Bedingung, daß ihre Arbeit auf dem dabei in der Waagerechten durchlaufenen Weg dx dieselbe ist, wie sich für die Schwerkraft ergeben hatte, also $m p dx = m g db$. Die direkt nicht ermittelbare Größe db ergibt sich daraus, daß nach der Definition der Äquipotentialflächen die Arbeitsdifferenz zwischen I und II überall dieselbe sein muß, $g b = \text{const}$, also $g db = -b dg$, so folgt schließlich

$$p = -\frac{dg}{dx} \cdot b.$$

Also diese vielberufene „Fluchtkraft“ hat eigentlich und unmittelbar nichts zu tun mit dem Pol, noch mit der Rotation überhaupt¹⁾! Sie ist proportional dem Horizontalgradienten der Schwere und diesem entgegengerichtet. Mit anderen Worten, flottierende leichtere Schollen „flüchten“ von der größeren Schwere zur geringeren.

¹⁾ Welche Verwirrungen die bisherigen unklaren Darstellungen der „Polfluchtkraft“ bei einem geophysikalischen Laien anrichten können, zeigt das Buch von R. STAUB, *Der Bewegungsmechanismus der Erde* (Berlin 1928). Da werden fortwährend Polflucht- und Fliehkraft zusammengeworfen und daraus die merkwürdigsten Sachen abgeleitet.

Die vorstehend entwickelte Formel ist kurz, aber sie ist trotzdem streng richtig. Verbindet man nun in einer Karte die Orte mit gleichem Wert der Schwerkraft g miteinander, so sind diese Kurven die Aquipotentiallinien unserer „Fluchtkraft“, und damit ist das Feld derselben, das der Definition nach ja nur flächenhaft ausgedehnt ist, vollkommen beschrieben; die Kraft selbst kann man in der gebräuchlichen Weise durch Ziehen der orthogonalen Trajektorien ermitteln. Solche Karten gleicher Schwerkraft sind bereits von ACKERL¹⁾ für die ganze Erde entworfen worden, und daraus ist sofort zu ersehen, daß unsere „Fluchtkraft“ durchaus nicht so regelmäßig, wie man gemeint hat, im Meridian vom Pol zum Äquator zielt, sondern sehr verschiedene Richtungen annehmen kann. Weiter soll hier nicht darauf eingegangen werden; denn das würde zu einer Diskussion der für g anzuwendenden Reduktion und wohl auch noch zu anderen Weiterungen führen, eine Bemühung, die mir in diesem Kapitel — offengestanden — nicht genug zu lohnen scheint. Die gebräuchlichen Ableitungen haben die Erde geometrisch als Rotations-sphäroid idealisiert. Es ist fraglich, ob das in unserem Problem realen Wert hat; insbesondere bei einer Rechnung wie der, aus welcher MILANKOVITCH die Polbahn ermitteln will, dürfte man nicht jene Generalisierung verwenden, sondern müßte die wirklichen „Fluchtkräfte“ in Rechnung ziehen; die Abweichung der an den einzelnen Schollen wirklich angreifenden Kräfte von der idealisierten Polfluchtkraft ist offenbar von gleicher Größenordnung wie die dort benutzten „Anomalien der Trägheit“, man darf nicht das eine berücksichtigen und das andere vernachlässigen. Übrigens: um den Vergleich zu ermöglichen, wollen wir auch die meist gebrauchte Formel für die Polfluchtkraft entwickeln. Für das Rotationssphäroid hat man zu setzen

$$g = g_a (1 + \beta \cdot \sin^2 \varphi).$$

Die Bewegung geht nur im Meridian vor sich, also $dx = r \cdot d\varphi$, somit

$$p = -\frac{b}{r} g_a \cdot \beta \cdot \sin 2\varphi.$$

In jedem Fall — in der realen Mannigfaltigkeit sowie in der gebräuchlichen Idealisierung — ist die Polfluchtkraft sehr klein, sie kann äußerstenfalls $\frac{1}{500000}$ der Schwerkraft erreichen, das entspricht, als Gefälle angesehen, einer Neigung der Gleitbahn von etwa $0.4''^2$.

¹⁾ F. ACKERL, Das Geoid I. Gerl. Beitr. Geophys. 29 (1931) 273—335.

²⁾ Meistens wird kaum mit der Hälfte dieses Betrages zu rechnen sein, beträgt doch das ganze Gefälle, das vom Pol bis zum Äquator gewonnen werden kann, nur 13 m (unter der Annahme, daß die Kontinentalschollen 5000 m über das mittlere Simaniveau aufragen).

Schaffen irgendwelche Umstände ein Gegengefälle oder etwas solchem Gleichzuhaltendes, auch nur von diesem minimalen Betrag, so muß die Polflucht steckenbleiben; vollkommen waagerechte Lage der Gleitbahn ist unerläßliche Bedingung, wenn sie, wie berechnet, zustande kommen soll. Nun, soviel wir wissen, sind die stofflichen Trennungsflächen im Untergrund und die sich daraus ergebenden Bewegungsbahnen oft nicht waagrecht, und die sich daraus ergebenden Schollenbewegungen haben wieder oft eine Hebung als Komponente; diese kann von der Polfluchtkraft nicht abgeleitet werden. Ein Teil der Schollenbewegungen führt zu einer tektonischen Verformung des Materiales, was ebenfalls die Überwindung eines fixen (und gar nicht geringen) Widerstandes bedeutet, auch dazu ist die Polfluchtkraft nicht fähig. Diese ist also in dem Kräftesystem, das die Schollen der Erdkruste bewegt, gewiß nicht das bestimmende Element, sie ist eine einzelne — und wahrscheinlich eine der kleinsten Komponenten.

In einem ist eine derartige, die ganze Erdoberfläche erfassende Feldkraft größeren, aber lokalen Kräften überlegen, sie vermag eher die Kruste für sich überm Kern zu verschieben, sozusagen der Erde die Haut über die Ohren zu ziehen¹⁾. Und wenn sie auch verhältnismäßig sehr klein ist, so könnte sie doch mit der Zeit bestimmend zur Geltung kommen, wenn die größeren Beeinflussungen ungeordnet, wirr und zufällig wirken würden und sich daher aus einem langfristigen Mittel wegheben müßten. In der bezüglichen Literatur sieht's ja wirklich recht chaotisch aus! Betrachtet man aber — ohne jede Voreingenommenheit — in der Erdkruste die weltweit geschwungenen Bogen der heutigen Kettengebirge (ein Bild, das, soweit rekonstruierbar, auch in den Gebirgssystemen der früheren geologischen Zeiten immer wiederkehrt), so kann kein Zweifel sein, daß die gebirgsbildenden Bewegungen Ausdruck eines großen, geordneten, erdumspannenden Kräfteplanes sein müssen. Die langsamen epirogenetischen Bewegungen, das Auf- und Abschwanken der Kontinente usw. könnte man eher für ungeordnet und rein zufällig verteilt erklären, aber gerade Geologen, welche sich mit diesem Gegenstand viel beschäftigt haben (z. B. HAUG), sind dafür eingetreten, daß

¹⁾ Außer der Polfluchtkraft wäre dazu höchstens noch die Gezeitenreibung fähig. Auch diese ist sehr klein. Sie kann hier außer Betracht bleiben, weil sie nach der Art ihres Angreifens auf Verlegung des Poles offenbar nur wenig einwirkt. In früheren Stadien des Systemes Erde—Mond war sie allerdings viel größer, wie auch die dem Bau der Erde aufgeprägten Spuren zeigen. [Vgl. R. SCHWINNER, Astrophysikalische Grundlagen der Geologie, Mitt. Geol. Ges. Wien. 19 (1926) 145/146.]

auch in diesen Bewegungen ein System liege — welches, darüber sind sie allerdings nicht ganz einig. Jedenfalls, wenn die gebirgsbildenden Kräfte ein erdumspannendes System vorstellen, können, ja müssen sie die Bewegung der Kruste gegenüber ihrer Unterlage und gegenüber der Drehachse auch systematisch beeinflussen. Daß wir diese Zusammenhänge nicht übersehen, berechtigt nicht, sie beiseitezulassen. Leitet man die Bewegungen der Kruste einzig aus den viel schwächeren planetarischen Feldkräften (Polflucht, Gezeitenreibung usw.) ab, hauptsächlich nur aus dem Grunde, weil diese besser bekannt und der Rechnung eher zugänglich erscheinen, so dürfte das von der Wirklichkeit ziemlich weitab führen.

Die tektonischen Massenverschiebungen müssen — wie öfter schon erörtert worden ist — auch Verschiebungen der Drehachse des Gesamterdkörpers zur Folge haben. Darauf brauchen wir hier nicht einzugehen; diese sind nach allen möglichen Annahmen — auch der eines beträchtlichen Zusatzes von Unterströmung zu den sichtbaren bewegten Massen — klein und erreichen nicht das Ausmaß von geologisch erwähnenswerten Polverschiebungen. Man muß hier auch in Betracht ziehen, daß die tektonischen Massenbewegungen auf einem erdumspannenden Gebirgssystem — wie der Kreis um den Stillen Ozean oder der Mittelmeergürtel — in ihrer Wirkung auf den Pol sich vielfach gegenseitig stören und zerstören müssen.

Zusammenfassend kann man nur sagen, daß es heute noch völlig unsicher ist, ob aus der Gesamtheit der planetarischen Feldkräfte und der in den äußeren Erdschalen beheimateten orogenetischen und epirogenetischen Impulse säkulare Verschiebung des Poles sich ergebe oder nicht. Ja, eigentlich nicht einmal, ob man eine solche postulieren solle oder nicht, kann bestimmt entschieden werden. Übersehen wir die zwei Hauptgruppen der empirischen Unterlagen, so müssen wir ehrlich sagen: Paläoklimatologie: ein frommer Wunsch mehr als eine wissenschaftliche Wirklichkeit; Gebirgsbildung als Mechanismus: das war 1878 ein kühnes Programm, es ist heute immer noch Programm und manches problematischer geworden als damals. Solange das Fundament nicht tragfähiger ist, bedeuten geophysikalische Deduktionen nur Probe und Vorarbeit. Gewiß, es ist wünschenswert, daß auch von dieser Seite her die Denkmöglichkeiten durchprobiert werden; in diesem Sinne sind die genannten Arbeiten von MILANKOVITCH ein sehr begrüßenswerter Beitrag zur Klärung dieser schwierigen Probleme. Aber es wäre nicht vorteilhaft, wenn diese interessanten Versuche über Hand- und Lehrbücher zu den Laien gebracht würden, bei denen sie kaum anderes als schädliche Mißverständnisse anrichten könnten.