ABPLATTUNG

UND

GEBIRGSBILDUNG

VON

DR. AUGUST BÖHM EDLEN VON BÖHMERSHEIM

O. Ö. PROFESSOR DER GEOGRAPHIE AN DER K. K. UNIVERSITÄT
IN CZERNOWITZ

MIT 3 TEXTFIGUREN

LEIPZIG UND WIEN

FRANZ DEUTICKE

1910

Verlags-Nr. 1661.

Druck von Rudolf M. Rohrer in Brünn

VORWORT

Die vorliegende Schrift beansprucht keineswegs, das durch den Titel bezeichnete Thema zu erschöpfen. Einerseits ist unsere Kenntnis in mancher Hinsicht noch zu unvollkommen, um für manche Berechnungen und Schlüsse eine sichere, unverrückbare Grundlage zu liefern, und andererseits steht das Problem mit so vielen anderen in innigem Zusammenhang, daß die Kraft des einzelnen zur Behandlung aller Fragen und Ausblicke, die sich darbieten, nicht ausreicht.

Insbesondere ist noch nicht untersucht, wie es sich bei stärkerer Abplattung und weit mächtigerem äquatorialen Wulst um die Schiefe der Ekliptik, die Exzentrizität der Erdbahn und die Präzession der Tag- und Nachtgleichen verhalten haben mußte. Heute beträgt der Unterschied zwischen dem Volumen des Erdsphäroides und dem der eingeschriebenen Kugel 7 227 Millionen Kubikkilometer und das Verhältnis ist $\frac{1}{149}$; bei fünfmal so großer Abplattung sind die betreffenden Werte 35 894 Millionen Kubikkilometer und $\frac{1}{29}$, bei zehnmal so großer Abplattung wie heute 71 183 Millionen Kubikkilometer und $\frac{1}{14}$. Die vorhin genannten Größen mußten also bei stärkerer Abplattung schon aus diesem Grunde ganz anders sein als gegenwärtig. Derartige Untersuchungen liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.

Hier soll nur gezeigt werden, daß mit der durch die Gezeitenreibung veranlaßten Gestaltsänderung der Erde Massenbewegungen verknüpft sind, die ausreichen, um die größten und wichtigsten geologisch-dynamischen Vorgänge zu erklären, denen man in der Geschichte der Erde begegnet: die Verschiebungen der Strandlinie und die Gebirgsbildung.

Czernowitz, den 12. Oktober 1909

August v. Böhm

INHALT

I. Einleitung, Formeln und Konstruktion

Soweit auch die Meinungen über den Zustand des Erdinnern im einzelnen auseinandergehen mögen: daß die Erde einen großen Wärmevorrat in sich birgt, der ehedem noch weit größer war als heute, da er sich, wenn auch gegenwärtig nur mehr äußerst langsam, durch Ausstrahlung in den Weltraum beständig vermindert — darüber herrscht nicht der geringste Zweifel.

Wenn nun die um ihre Achse rotierende Erde abkühlt und dabei durch Kontraktion allmählich kleiner und kleiner wird, so wirkt dies beschleunigend auf die Rotation.

Bezeichnen wir die Dichte der Erde mit ϱ und den Abstand eines Volumelementes dv von der Drehungsachse mit r, so ist das Trägheitsmoment K der Erde bezüglich dieser Drehungsachse

$$K = \int \varrho \,.\, r^2 \,.\, dv$$

Für ein homogenes Sphäroid mit den Halbachsen a und b ist die Dichte ϱ konstant und das Trägheitsmoment durch die Formel

$$K = \frac{8\pi a^4 b}{15} \varrho$$

gegeben.

Die Masse M des homogenen Sphäroides ist aber

$$M = \frac{4\pi a^2 b}{3} \varrho$$

daher

$$\varrho = \frac{3M}{4\pi a^2 b}$$

also in diesem Falle

$$K = \frac{8\pi a^4 b}{15} \cdot \frac{3M}{4\pi a^2 b} = \frac{2}{5} a^2 M$$

Nach einem mechanischen Prinzipe bleibt nun bei einem sich selbst überlassenen rotierenden Körper das Flächenmoment (das halbe Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und Trägheitsmoment) konstant.

Bezeichnen wir also die große Halbachse des Sphäroides nach einer gewissen Kontraktion mit a_1, die Winkelgeschwindigkeiten vorher und nachher mit ω und ω_1, so muß also, da die Masse der Erde — von dem Zuwachs durch Meteoriten und kosmischen Staub und dem Entweichen von Gasmolekeln abgesehen — unverändert bleibt, sein

$$\frac{1}{5}\omega a^2 M = \frac{1}{5}\omega_1 a_1{}^2 M$$
$$\omega a^2 = \omega_1 a_1{}^2$$
$$\omega : \omega_1 = a_1{}^2 : a^2$$

Die Winkelgeschwindigkeit der Rotation am Äquator wächst also im umgekehrten quadratischen Verhältnisse der radialen Kontraktion.

Die Fliehkraft f, f_1 am Äquator wächst dagegen im umgekehrten kubischen Verhältnisse der Kontraktion, denn es ist

$$f : f_1 = \omega^2 a : \omega_1{}^2 a_1$$
$$\frac{f}{f_1} = \frac{\omega^2 a}{\omega_1{}^2 a_1} = \frac{a_1{}^4 a}{a^4 a_1} = \frac{a_1{}^3}{a^3}$$
$$f : f_1 = a_1{}^3 : a^3$$

Da nun die mit der Gravitation identische Schwerkraft γ, γ_1 sich bekanntlich dem umgekehrten Verhältnisse des Quadrates der Entfernung entsprechend verhält, also

$$\gamma : \gamma_1 = a_1{}^2 : a^2$$

so ist

$$\frac{f}{\gamma} : \frac{f_1}{\gamma_1} = \frac{a_1{}^3}{a_1{}^2} : \frac{a^3}{a^2}$$
$$\frac{f}{\gamma} : \frac{f_1}{\gamma_1} = a_1 : a$$

Das heißt: Bei der mit der Abkühlung verbundenen Kontraktion der Erde wird das Verhältnis von Fliehkraft zu Schwerkraft am Äquator im umgekehrten Verhältnisse der Radien größer; es muß also auch die Abplattung der sich kontrahierenden Erde größer werden.

Infolge der sphäroidischen Gestalt der Erde entspricht nun aber das Verhältnis der Schwerkraft nicht genau dem umgekehrten Verhältnisse der Quadrate der Radien, und es kann deshalb auch die Steigerung der Abplattung nicht genau dem umgekehrten Verhältnisse der Radien entsprechen; sie wird vielmehr unter diesem Verhältnisse zurückbleiben.

Überdies ist bisher bei der ganzen Ableitung vorausgesetzt worden, daß die Masse des Sphäroides homogen sei, was bei der Erde nicht zutrifft. Infolgedessen hat das Trägheitsmoment der Erde einen andern Wert als den vorhin bestimmten, und deshalb läßt sich die Folgerung, daß sich bei der durch die Abkühlung bewirkten Kontraktion die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation im umgekehrten Verhältnisse der Quadrate der Radien vergrößere und daß die Abplattung im umgekehrten Verhältnisse der Radien zunehme, nicht aufrecht erhalten.

Das Trägheitsmoment des Erdsphäroides ist direkt wohl kaum zu berechnen, da wir das Gesetz nicht kennen, nach dem die Dichte gegen das Zentrum zunimmt. Es ist indessen leicht einzusehen, daß das Trägheitsmoment eines Sphäroides, dessen Dichte nach dem Innern zunimmt, wie es bei der Erde der Fall ist, kleiner sein muß als es wäre, wenn die Dichte allenthalben gleich der mittleren Dichte wäre. F. R. Helmert[1]) hat aus der Mondbewegung und aus den Größen der Präzession und Nutation das Trägheitsmoment der Erde bezüglich der Rotationsachse zu $0{\cdot}3321\, a^2 M$ gefunden anstatt zu $0{\cdot}4\, a^2 M$, welche Größe es hätte, wenn die Erde homogen wäre.

Es ist klar, daß der Faktor, der in dem Ausdrucke für das Trägheitsmoment dem Produkte $a^2 M$ voransteht, desto kleiner wird, je geringer die Dichte an der Oberfläche gegenüber der im Innern ist[2]). In früheren Zeiten, als die Hauptabkühlung der Erde noch an der Oberfläche erfolgte, war nun die Dichte der äußeren Partien jedenfalls geringer als jetzt, daher jener Faktor kleiner. Mit zunehmender Abkühlung und Verdichtung der Kruste wurde der Faktor allmählich immer größer. Dieser Faktor, dessen Wert sich also ändert, zumal ja auch die kleine Halbachse in

---

[1]) F. R. Helmert: Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. II. Band, Leipzig 1884, S. 473.

[2]) Vergleiche hierüber S. D. Poisson: Traité de Mécanique. 3ème Édition, par J. G. Garnier. Bruxelles 1838, S. 228.

ihm enthalten ist, fällt deshalb bei der Gleichsetzung der Flächenmomente nicht weg, wie es beim homogenen Sphäroid der Fall wäre, wo er konstant ist, sondern er beeinflußt das Endresultat in der Weise, daß, wenn man ihn bei Beginn und am Ende der ins Auge gefaßten Abkühlung mit n und $n + \nu$ bezeichnet, wir aus der Gleichsetzung der Flächenmomente

$$\frac{1}{2}\,\omega n a^2 M = \frac{1}{2}\,\omega_1 (n + \nu)\, a_1{}^2 M$$

das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten erhalten zu

$$\omega : \omega_1 = (n + \nu)\, a_1{}^2 : n a^2$$

$$\omega : \omega_1 = \frac{a_1{}^2}{a^2} \cdot \frac{n + \nu}{n}$$

daher das Verhältnis der Fliehkräfte

$$f : f_1 = \frac{a_1{}^3}{a^3} \left(\frac{n + \nu}{n}\right)^2$$

und also auch

$$\frac{f}{\gamma} : \frac{f_1}{\gamma_1} = \frac{a_1}{a} \left(\frac{n + \nu}{n}\right)^2$$

Es wird also die Abplattung der Erde infolge der durch die Abkühlung bewirkten Kontraktion und der daraus folgenden Beschleunigung der Rotation keinesfalls entsprechend dem umgekehrten Verhältnisse der radialen Kontraktion größer, sondern um einen geringeren Betrag; ja, es erscheint hiernach nicht ausgeschlossen, daß mit jenem Vorgange überhaupt keine Vergrößerung, sondern umgekehrt eine Verringerung der Abplattung verknüpft sei.

Sei dem nun, wie ihm wolle, fest steht, daß aus der Abkühlung der Erde eine auch nur einigermaßen in Betracht kommende Vergrößerung der Abplattung nicht erwachsen kann. Denn selbst wenn die Vergrößerung der Abplattung umgekehrt proportional der Kontraktion erfolgte, was aber dem Vorigen zufolge völlig ausgeschlossen ist, so würde bei einer Kontraktion um ein Tausendstel des Radius, die als solche immerhin schon recht beträchtlich wäre und bei den heutigen Dimensionen der Erde einer Verkürzung des mittleren Halbmessers um mehr als 6 Kilometer entspräche, die Abplattung nur um ein Tausendstel ihres Wertes zunehmen.

In entgegengesetztem Sinne wie die Kontraktion durch Abkühlung wirkt die Gezeitenreibung auf die Abplattung der Erde.

Unter der bremsenden Einwirkung der Flutwelle verringert sich die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde und die Abplattung muß deshalb geringer werden.

Nun ist aber nach Lord Kelvin und P. G. Tait[1]) die Beschleunigung der Erdumdrehung durch die Abkühlungskontraktion geradezu minimal gegenüber der Verlangsamung durch die Gezeitenreibung. Dann muß natürlich auch die Vergrößerung der Abplattung, die infolge der Abkühlung eintreten würde, minimal sein gegenüber der Verminderung, die durch die Gezeitenreibung veranlaßt wird.

Bekanntlich hat Laplace im Jahre 1786 aus Berechnungen alter Sonnenfinsternisse geschlossen, daß der Sterntag seine Länge seit dem Jahre 729 v. Chr. noch nicht um $0{\cdot}01^s$ geändert hat, während nach Newcomb die Länge des Sterntages von 1769—1789 und von 1840—1861 um eine Kleinigkeit zugenommen, in dem folgenden Dezennium aber wieder etwas abgenommen haben soll. Die letzteren Angaben sind indessen durch neuere Beobachtungen und Untersuchungen nicht bestätigt worden, und auch Laplaces Ergebnis ist nicht unangefochten geblieben. Insbesondere hat John C. Adams auf Grund der seither genauer gewordenen Kenntnis der Mondbewegung berechnet, daß die Erde, als Zeitmesser betrachtet, infolge der Gezeitenreibung im Verlaufe eines Jahrhunderts um 22^s hinter einer gleichmäßig gehenden Uhr zurückbleibt[2]), was ungefähr dem Dreifachen von Laplaces Grenzwert gleichkommt.

Aber selbst wenn sich die Einflüsse der Gezeitenreibung und der Abkühlung auf die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde kompensierten, so daß die Länge des Sterntages unverändert bliebe, müßte eine Verminderung der Abplattung resultieren.

Bleibt nämlich trotz der Kontraktion die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde dieselbe, dann haben wir

$$f : f_1 = \omega^2 a : \omega^2 a_1 = a : a_1$$

und da

$$\gamma : \gamma_1 = a_1{}^2 : a^2$$

[1]) Lord Kelvin (Sir William Thomson) and P. G. Tait: Treatise on Natural Philosophy. Part II, 3rd Reprint, Cambridge 1903, S. 415, 418.

[2]) Zitiert nach Lord Kelvin und Tait, l. c., S. 417—418.

folgt für diesen Fall

$$\frac{f}{\gamma}:\frac{f_1}{\gamma_1}=\frac{a}{a_1^2}:\frac{a_1}{a^2}$$

$$\frac{f}{\gamma}:\frac{f_1}{\gamma_1}=a^3:a_1^3$$

Das heißt: Wenn bei der Kontraktion der Erde durch Abkühlung die Umdrehungsgeschwindigkeit sich nicht vergrößert, sondern unter dem entgegenwirkenden Einflusse der Gezeitenreibung konstant bleibt, so ändert sich das Verhältnis von Fliehkraft zu Schwerkraft am Äquator entsprechend den dritten Potenzen der äquatorialen Halbachsen, was natürlich eine entsprechende Verminderung der Abplattung zur Folge hat.

Vergleicht man dieses Resultat mit dem vorhin gefundenen, daß unter dem alleinigen Einflusse der Kontraktion durch Abkühlung die Abplattung der Erde — wenn überhaupt — nicht ganz im umgekehrten Verhältnisse der bezüglichen Halbachsen zunimmt, so sieht man leicht ein, daß die Gezeitenreibung hinsichtlich der Einwirkung auf die Abplattung der Kontraktion durch Abkühlung gegenüber stark im Vorteil ist, so zwar, daß eine Kompensation dieser beiderseitigen Einwirkungen erfolgen müßte, wenn auch die durch die Abkühlung bewirkte Beschleunigung der Rotation durch die Bremsung der Flutwelle nur zum Teil wettgemacht werden würde.

Betrachtet man die Erde als homogene Kugel vom Halbmesser $R = 6\,370$ *km*, so würde die Länge des Sterntages infolge einer Kontraktion um den tausendsten Teil des Radius — also um rund 6 *km* — nur um $2^m\ 42^s$ abnehmen. Zu einer Kontraktion um jenen Betrag wären nach einem Ansatze von H. Hergesell (vgl. weiter unten, S. 25) zirka 238 Millionen Jahre erforderlich. Dagegen würde die Gezeitenbremsung nach dem Adamsschen Werte zu einer Verlangsamung der Rotation um jene $2^m\ 42^s$ nur 13 Millionen Jahre benötigen. Selbst wenn also die Verlangsamung der Rotation durch die Gezeitenreibung nur $^1/_{18}$ des von Adams berechneten Effektes hätte, würde sie ausreichen, um die aus der Abkühlung erwachsende Beschleunigung zu kompensieren. Aber selbst dann müßte sich, wie gezeigt, die Abplattung im kubischen Verhältnisse der radialen Kontraktion vermindern.

Daß sich die Abplattung der Erde jemals verstärkte oder verstärkt hätte, erscheint demnach völlig ausgeschlossen. Die Abplattung verringert sich vielmehr beständig, ohne daß freilich diese Verminderung dabei auch gleichmäßig erfolgen müßte. Die Abkühlung entspricht im großen und ganzen jedenfalls einer gesetzmäßig abnehmenden Reihe, also einer gleichsinnig gekrümmten Kurve, aber das Ausmaß der Gezeitenreibung ist von so vielen veränderlichen Größen abhängig, daß es sehr wohl auf- wie abwärts schwanken kann. In geologischer Zeit, seitdem die Erde eine Kruste mit Ozeanen besitzt, hat sich das Tempo der Abkühlung wohl nur mehr wenig geändert. Dagegen ist es sehr wahrscheinlich, daß vor verhältnismäßig nicht allzu langer Zeit der Mond der Erde viel näher stand als jetzt, und, da sich nach G. H. Darwin[1]) die Verzögerung der Erdrotation durch die Gezeitenreibung umgekehrt wie die sechste Potenz der Entfernung ändert, so ist damit zu rechnen, daß noch in geologischen Zeiten die Gezeitenbremsung viel stärker war als heute. Da alsdann auch die Verringerung der Abplattung viel rascher vor sich gegangen sein mußte, als es gegenwärtig der Fall ist, so ist zurückzuschließen, daß die Erde vor Äonen weit stärker abgeplattet war als jetzt.

Wie groß die Abplattung der Erde einstmals und verschiedentlich gewesen, darüber genauere Angaben zu machen, läßt der gegenwärtige Stand unserer Kenntnis freilich nicht zu. Wenn nach G. H. Darwin die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde ursprünglich 4mal[2]), ja 6 bis 8mal[3]) größer gewesen sein soll als heute und wenn M. P. Rudzki[4]) aus dem Ausmaße der Gebirgsfaltungen auf eine Verkürzung des Erdhalbmessers seit der kambrischen Zeit um 51 *km*, C. E. Dutton[5]) auf eine solche seit der Kreidezeit um 48 *km*, A. Heim[6]) auf eine solche von 57 *km* schließt[7]), so ist die

[1]) G. H. Darwin: Ebbe und Flut sowie verwandte Erscheinungen im Sonnensystem. Autorisierte deutsche Ausgabe. Leipzig 1902, S. 248.

[2]) G. H. Darwin: On the Precession of a Viscous Spheroid, and on the Remote History of the Earth. Philos. Trans. Roy. Soc., London, CLXX, Pt. 1, 1879, S. 447.

[3]) G. H. Darwin: Ebbe und Flut, S. 255, 256.

[4]) M. P. Rudzki: Sur l'Age de la Terre. Bull. Acad. Sci. Krakau 1901, S. 72—94.

[5]) C. E. Dutton: A Criticism upon the Contractional Hypothesis. Amer. Journ. Sci., VIII, 1874, S. 121.

[6]) A. Heim: Der Mechanismus der Gebirgsbildung. II, Basel 1878, S. 213.

[7]) M. Neumayr (Erdgeschichte, I, Leipzig 1886, S. 366) bezeichnet auf Grund einer andern Erwägung eine Verkürzung des Erdhalbmessers seit der silurischen Zeit um 5 *km* als Minimum.

Grundlage dieser an sich gewiß richtigen Berechnungen doch derart unsicher[1]), daß wir hierin schließlich doch nichts anderes als das Ergebnis vernünftiger Schätzungen erblicken können. Immerhin aber dürfte diesen Schätzungen doch so viel zu entnehmen sein, daß, wenn wir die Geschichte der Erde rückwärts verfolgen, wir auf Abplattungen kommen, die die heutige um ein Mehrfaches übertreffen.

Nun konnte die Verringerung der Abplattung, also das Kugelähnlicherwerden der Erde, begreiflicherweise nicht ohne Massenverschiebungen vor sich gehen, die natürlich auch die feste Erdkruste betreffen mußten. Wir wollen trachten, eine Anschauung darüber zu gewinnen, in welcher Weise diese Massenverschiebungen, diese Formveränderungen erfolgten.

Dabei wollen wir zunächst unseren Bilck in die Zukunft richten und untersuchen, wie sich die Sache gestalten würde, wenn die Erde völlig in die Kugelgestalt überginge. Wir untersuchen also die letzte, noch bevorstehende Etappe eines Prozesses, der stetig vor sich geht, eine Etappe, deren Ausmaß, wie wir gesehen haben, jedenfalls nur einem Bruchteile der Vergangenheit entspricht. Der Übergang zur Kugel ist vorerst leichter zu verfolgen als der von einem andern zum heutigen Sphäroid, und im übrigen bleibt es sich gleich, welchen Teil einer gesetzmäßigen Entwicklung man studiert. Wir könnten gerade so gut überhaupt von der Kugel ausgehen und die ganze Entwicklung in umgekehrter Richtung verfolgen. Sind wir erst einmal über jene nun zu untersuchende letzte Etappe im klaren, dann wird es nicht schwer fallen, die entsprechenden Rückschlüsse zu ziehen.

Vorläufig sehen wir auch von der Kontraktion der Erde durch Abkühlung gänzlich ab und untersuchen das Problem rein geometrisch unter der einzigen und einfachen Annahme, daß die Erde unter der bremsenden Einwirkung der Mondflutwelle[2]) immer

---

[1]) C. R. Van Hise: Estimates and Causes of Crustal Shortening. Journ. of Geol., VI, Chicago 1898, S. 40.

[2]) Die Gezeitenkraft der Sonne beträgt nicht ganz die Hälfte von der gegenwärtigen des Mondes. Da in früheren Zeiten wohl der Mond, nicht aber auch die Sonne der Erde näher war als jetzt, so ist das Verhältnis der Gezeitenkraft von Mond und Sonne vordem für die Sonne noch ungünstiger gewesen.

langsamer und langsamer und schließlich gar nicht mehr rotierte[1]) und alsdann früher oder später die reine Kugelgestalt annähme.

Ob dabei[2]) das Volumen der Erde dasselbe bliebe oder sich veränderte, hinge davon ab, ob mit der Umlagerung der Massenteilchen eine Änderung der mittleren Dichte der Erde verbunden wäre. Da ein Körper in Kugelgestalt die kleinste Oberfläche hat, so wäre im Sinne der modernen Theorien über die Erklärung der Gravitation durch Ätherdruck wohl zu vermuten, daß sich die mittlere Dichte eines Körpers beim Übergange zur Kugelgestalt verringere, also sich das Volumen vergrößere.

Wenn man jedoch bedenkt, daß das Volumen des äquatorialen Wulstes, um dessen Ausgleichung es sich handelt — nämlich das Volumen desjenigen Teiles des Erdsphäroides, der über die Oberfläche der inhaltsgleichen, konzentrisch gedachten Kugel hinausragt — nur 1 395 Millionen Kubikkilometer beträgt gegenüber 1 082 841 Millionen Kubikkilometern der ganzen Erde — also nicht einmal den 777. Teil —; wenn man weiter bedenkt, daß die Volumsänderung, die mit der Gestaltsveränderung allenfalls verbunden wäre — wohlgemerkt: nur mit der Gestaltsänderung, denn von der Kontraktion durch Abkühlung sehen wir ja vorläufig ab — doch nur wiederum einen außerordentlich kleinen Bruchteil jenes Bruchteiles ausmachen könnte; und wenn man sich schließlich vor Augen hält, daß eine Änderung des Erdvolumens selbst um $\pm$ 100 Millionen Kubikkilometer nur eine Änderung des mittleren Erdhalbmessers um nicht einmal ganz $\pm 0 \cdot 2\,km$[3]) in sich schlösse: so wird man erkennen, daß es innerhalb des Rahmens der zunächst folgenden Untersuchungen statthaft ist, Volumen und mittlere Dichte der Erde als von der Gestalt unabhängig zu betrachten.

Wir können also, ohne einen merklichen Fehler zu begehen, annehmen, daß das Erdvolumen beim Übergange in die Kugelform gewahrt bliebe.

---

[1]) Die langsame Rotation, die dann je einmal in dem entsprechenden Mondmonat zugleich mit der Umdrehung um den gemeinsamen Schwerpunkt mit dem Mond erfolgte, kommt hier nicht in Betracht.

[2]) Nämlich bei der Gestaltsänderung an sich; auf die Volumenverminderung, die infolge der Verminderung der Fliehkraft eintritt, kommen wir später zurück.

[3]) Genauer $+ 196{\cdot}08$ und $- 196{\cdot}46\,m$.

In Figur 1 stelle QAP einen Meridianquadranten vor; es sei ferner die große Halbachse $CQ = a$, die kleine $CP = b$. Der Halbmesser der Kugel, in die die Erde nach dem Aufhören der Rotation schließlich überginge und die also mit dem heutigen Erdsphäroide den gleichen Inhalt $\frac{4}{3} a^2 b \pi$ haben würde, müßte

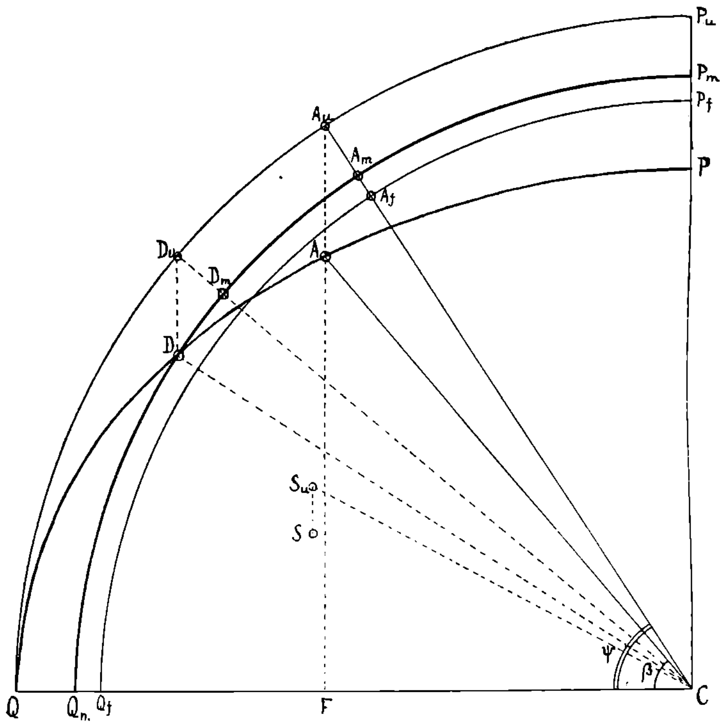

Fig. 1

demnach $\sqrt[3]{a^2 b}$ betragen. Wir wollen diese Kugel fortan wie schon bisher kurzweg als die „inhaltsgleiche Kugel“ bezeichnen; ihr Halbmesser, der mittlere Erdradius, sei $CQ_m = R_m$.

Wir betrachten irgend einen Punkt der Erdoberfläche, z. B. den Punkt A des Meridianquadranten QAP. Seine geozentrische Breite sei β, die geographische φ. Geht die Erde in die inhaltsgleiche Kugel über, so wird der Punkt A in deren Meridiandurchschnitt $Q_m P_m$ nach A_m gelangen.

Wir können jetzt schon aussagen, daß A_m nicht in der Verlängerung des Radius CA, sondern polwärts gelegen sein muß.

Denn um das Volumen, um das der äquatoriale Wulst auf jeder Sphäroidhälfte über die inhaltsgleiche Kugel emporragt, bleibt die Erdoberfläche polwärts innerhalb jener Kugeloberfläche zurück. Dieser „Hohlraum" — man gestatte der Kürze wegen den Ausdruck — ist deshalb bis zu jedem Punkte vor dem Pole immer noch kleiner als der halbe äquatoriale Wulst, der nunmehr dem Raumausmaße nach an seine Stelle kommt. Es muß also jeder Punkt des Meridianquadranten zwischen Äquator und Pol polwärts wandern. Nur der Durchschnittspunkt mit dem Äquator und der Pol selbst werden in der Richtung ihrer Radien verschoben, Q nach Q_m und P nach P_m. Diese beiden Punkte behalten ihre geozentrische Breite — 0° und 90° — bei; die Radien[1]) aller anderen Punkte werden polwärts gedreht und die geozentrische Breite dieser Punkte wird vergrößert.

Der Meridianquadrant QP der Erde und der Meridianquadrant $Q_m P_m$ der inhaltsgleichen Kugel schneiden sich in dem Punkte D. Nicht die Flächen DQQ_m und DPP_m, wohl aber die Volumina, die einer vollen Umdrehung einer jeden dieser Flächen um die Erdachse entsprechen, sind einander gleich. Um längere Umschreibungen zu vermeiden, wollen wir künftig ein solches Volumen als „Rotationsvolumen" (RotVol.) der betreffenden Fläche bezeichnen.

Es ist also

$$\text{RotVol. } DQQ_m = \text{RotVol. } DPP_m$$

Geht nun die Erde in die inhaltsgleiche Kugel über, so muß der Punkt D so weit nach Norden rücken, nach D_m, bis die Bedingung erfüllt ist:

$$\text{RotVol. } DQC = \text{RotVol. } D_m Q_m C$$

Dies gilt entsprechend auch für jeden andern Punkt unseres oder eines beliebigen Meridianquadranten. Denn bleibt beim Übergange der Erdgestalt zur Kugel das Erdvolumen unverändert, so muß natürlich auch das Rotationsvolumen eines jeden Meridianausschnittes unverändert bleiben. Wäre dem nicht so und würde irgend ein Meridianausschnitt sein Rotationsvolumen ändern, so

[1]) Unter Radius schlechtweg soll hier immer der nach dem Erd- beziehungsweise Sphäroid- oder Kugelmittelpunkte gezogene Radius verstanden werden.

müßten es des stetigen Verlaufes der gesamten Körperoberfläche wegen auch alle anderen in demselben Sinne und verhältnismäßig tun, und dann würde sich eben auch das Gesamtvolumen ändern. Es muß also auch der Punkt A so weit polwärts nach A_m verschoben werden, bis

$$\text{RotVol. } AQC = \text{RotVol. } A_m Q_m C$$

Unsere nächste Aufgabe ist es nun, das Ausmaß dieser Verschiebung zu bestimmen.

Nach der sogenannten Guldinschen Regel ist der Inhalt eines Körpers, der der Drehung einer ebenen Fläche um eine in ihrer Ebene liegende Achse entspricht, gleich dem Produkte aus dem Inhalte der Fläche und dem Wege ihres Schwerpunktes[1]).

Haben wir also die Flächen AQC und $A_m Q_m C$ sowie die Lage ihrer Schwerpunkte bestimmt, so können wir die betreffenden Volumina ohne weiteres berechnen. Denn der Weg eines jeden Schwerpunktes ist in unserem Falle gleich dessen Abstande von der Drehungsachse — der Erdachse — mal dem Drehungswinkel von 360°, diesen gemessen durch den entsprechenden Bogen eines Kreises vom Halbmesser 1, also gleich jenem Abstande mal 2π.

Wir ziehen den Bogen QP_u des der Meridianellipse zu umschreibenden Kreises mit dem Halbmesser $CQ = a$. Durch den Punkt A ziehen wir $A_u F \perp CQ$ und verbinden A_u mit C. Der Winkel $A_u CQ = \psi$ ist alsdann jener Winkel, der in der Geodäsie und Kartographie als die „reduzierte" (oder auch „verbesserte") Breite unseres Punktes A bekannt ist, dessen geozentrische Breite durch den Winkel $ACQ = \beta$ dargestellt ist[2]).

Nach einem bekannten planimetrischen Lehrsatze ist nun die Fläche der Ellipsensegmentshälfte AQF gleich $\frac{b}{a}$ mal der Fläche der Kreissegmentshälfte $A_u QF$, so daß

$$\text{Area } AQF : \text{Area } A_u QF = b : a \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

[1]) Die Fläche wird dabei so betrachtet, wie wenn sie in einer fast unendlich dünnen Schichte gleichmäßig mit Masse behaftet wäre.

[2]) In der Kartographie wird die reduzierte Breite meist auf den der Meridianellipse eingeschriebenen Kreis bezogen, indem von dem betreffenden Meridianpunkte ein Lot senkrecht auf die Erdachse bis zum Durchschnitt mit jenem Kreise gefällt wird. Dem Wesen der Ellipse zufolge erhält man auf diese Weise denselben Winkel ψ wie oben, da die Radien der bezüglichen Punkte beider Kreise zusammenfallen.

Nun verhalten sich bekanntermaßen die derselben Abszisse entsprechenden Ordinaten der Ellipse und des ihr umschriebenen Kreises wie die kleine Halbachse zur großen, also

$$AF : A_u F = b : a$$

und deshalb auch

$$\triangle AFC : \triangle A_u FC = b : a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Nun ist aber

$$\text{Area } AQF + \triangle AFC = \text{Area } AQC$$
$$\text{Area } A_u QF + \triangle A_u FC = \text{Area } A_u QC$$

Addieren wir deshalb (1) und (2), so erhalten wir

$$\text{Area } AQC : \text{Area } A_u QC = b : a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Ziehen wir nun vom Mittelpunkte C aus mit dem Halbmesser $CQ_f = \sqrt{ab}$ den mit der Ellipse inhaltsgleichen Kreis beziehungsweise den Quadranten $Q_f P_f$, der den Radius $A_u C$ in A_f schneidet, so ist, da sich Kreisausschnitte mit demselben Zentriwinkel wie die Quadrate ihrer Radien verhalten,

$$\text{Area } A_f Q_f C : \text{Area } A_u QC = ab : a^2 = b : a$$

Hieraus und aus (3) folgt nun sofort:

$$\text{Area } AQC = \text{Area } A_f Q_f C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Nun ist aber der Flächeninhalt eines Kreisausschnittes gleich dem Quadrate des Halbmessers mal dem halben Zentriwinkel; also ist wegen (4)

$$\text{Area } AQC = ab\,\frac{\psi}{2} = ab\pi\,\frac{\psi^\circ}{360^\circ} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$ [1]

Die Fläche kennen wir — nun müssen wir ihren Schwerpunkt suchen.

Nach einem Gesetze der Statik ist bei paralleler Projektion eines Körpers oder einer materiellen Fläche die Projektion des Schwerpunktes zugleich Schwerpunkt der Projektion.

---

[1] Diese höchst einfache Formel scheint — zumindest in weiteren Kreisen — nicht bekannt zu sein. Selbst in technischen Hilfs- und Handbüchern (Roessler, Weisbach, Templeton) habe ich nur die Formel für das Ellipsensegment $F = ab\,\frac{\beta - \sin\beta}{2}$ — wobei β den Zentriwinkel bezeichnet — gefunden. Um die Fläche des Ellipsensektors zu erhalten, muß man dann noch das dazu fehlende Dreieck berechnen, vorerst also noch eine Seite davon, was insgesamt recht umständlich ist.

Nun ist der Kreisausschnitt $A_u QC$ die Parallelprojektion des Ellipsenausschnittes AQC. Der Schwerpunkt S_u des Kreisausschnittes $A_u QC$ liegt nach einer statischen Regel in der Halbierungslinie seines Zentriwinkels ψ, und zwar in einem Abstande vom Mittelpunkte

$$S_u C = \frac{2}{3} a \frac{\sin \frac{\psi}{2}}{\frac{\psi}{2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)\;^{1)}$$

Auf CQ und CP als X- und Y-Achse eines rechtwinkligen Koordinatensystems bezogen, ergeben sich daraus sofort die Koordinaten des Punktes S_u zu

$$x_u = S_u C \cos \frac{\psi}{2} = \frac{2}{3} a \frac{\sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\psi}{2}}{\frac{\psi}{2}} = \frac{2}{3} a \frac{\sin \psi}{\psi} \quad . \quad (7)\;^{2)}$$

$$y_u = S_u C \sin \frac{\psi}{2}$$

Da nun nach der vorhin mitgeteilten Regel S_u als Schwerpunkt der Projektion von AQC zugleich die Projektion des Schwerpunktes von AQC ist, so ergibt sich die Lage des Schwerpunktes unseres Ellipsenausschnittes AQC aus den Koordinaten

$$x = x_u = \frac{2}{3} a \frac{\sin \psi}{\psi} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (8)$$

$$y = y_u \frac{b}{a}$$

y interessiert uns hier weiter nicht, aber $x = x_u = \frac{2}{3} a \frac{\sin \psi}{\psi}$ ist der gesuchte Abstand des Schwerpunktes des Ellipsenausschnittes AQC von der Drehungsachse CP.

Der Weg, den der Schwerpunkt des Ellipsenausschnittes AQC bei einer vollen Umdrehung um CP zurücklegt, ist nun

$$W = \frac{2}{3} a \frac{\sin \psi}{\psi} \cdot 2\pi = \frac{4}{3} a\pi \frac{\sin \psi}{\psi} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

---

[1]) In unserem speziellen Falle steht a für das allgemeine r; bei unserem der Ellipse umschriebenen Kreise ist nämlich $r = a$.

[2]) Da $\sin \psi = 2 \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\psi}{2}$.

Hieraus im Vereine mit (5) ergibt sich nun nach der Guldinschen Regel:

$$\text{RotVol. } AQC = ab\,\frac{\psi}{2}\cdot\frac{4}{3}\,a\pi\,\frac{\sin\psi}{\psi} = \frac{2}{3}\,a^2b\pi\,\sin\psi \quad . (10)$$

Nunmehr haben wir den Querschnitt A_mQ_mC und damit den Zentriwinkel desjenigen Rotationsvolumens zu berechnen, das in der inhaltsgleichen Kugel dem Rotationsvolumen AQC des Erdsphäroides entspricht. Der Halbmesser der inhaltsgleichen Kugel ist $CQ_m = \sqrt[3]{a^2b}$.

Nennen wir den Zentriwinkel A_mCQ vorläufig γ, so ist analog (5) der Querschnitt $= \sqrt[3]{(a^2b)^2}\,\frac{\gamma}{2}$, der Abstand des Schwerpunktes von der Drehungsachse wie bei (6) $= \frac{2}{3}\sqrt[3]{a^2b}\,\frac{\sin\gamma}{\gamma}$, also der Weg des Schwerpunktes $= \frac{4}{3}\sqrt[3]{a^2b}\;\pi\,\frac{\sin\gamma}{\gamma}$ und daher

$$\text{RotVol. } A_mQ_mC = (a^2b)^{\frac{2}{3}}\,\frac{\gamma}{2}\cdot\frac{4}{3}\,(a^2b)^{\frac{1}{3}}\,\pi\,\frac{\sin\gamma}{\gamma} = \frac{2}{3}\,a^2b\pi\sin\gamma \quad . (11)$$

Da nun aber RotVol. $A_mQ_mC =$ RotVol. AQC — denn wir haben ja jenes Rotationsvolumen gesucht, das in der inhaltsgleichen Kugel jenem aus dem Erdsphäroid entspricht — so ist aus (10) und (11)

$$\text{RotVol. } AQC = \tfrac{2}{3}\,a^2b\pi\,\sin\psi = \text{RotVol. } A_mQ_mC = \tfrac{2}{3}\,a^2b\pi\,\sin\gamma$$

Daraus folgt sofort

$$\gamma = \psi$$

so daß

$$\text{RotVol. } AQC = \text{RotVol. } A_mQ_mC = \tfrac{2}{3}\,a^2b\pi\,\sin\psi \quad . (12)$$ [1]

Aus den Formeln (5) und (12) ergeben sich nun zwei wichtige, meines Wissens bisher noch nicht bekannte Eigenschaften der „reduzierten" Breite, die unserer Entwicklung zufolge ganz allgemein für Ellipse und Sphäroid (Rotationsellipsoid) gelten und sich, wenn man die Begriffe der geozentrischen und der reduzierten Breite sinngemäß festhält, folgendermaßen ausdrücken lassen:

---

[1]) Für das Rotationsvolumen des doppelten Quadranten geht diese Formel, da $\sin 90^\circ = 1$, in den bekannten Ausdruck für den Inhalt eines Rotationsellipsoides $\frac{4}{3}\,a^2b\pi$ über.

1. Vergleicht man die Ellipse mit den Halbachsen a und b mit dem inhaltsgleichen Kreise vom Halbmesser $\sqrt{ab}$, so ist der durch die geozentrische Breite β bestimmte Ellipsenausschnitt inhaltsgleich mit dem Kreisausschnitte, dessen Zentriwinkel ψ gleich ist der reduzierten Breite von β.

Oder: Der durch die geozentrische Breite β bestimmte Ellipsenausschnitt ist gleich dem Flächeninhalte der Ellipse mal dem 360. Teile der in Graden ausgedrückten reduzierten Breite ψ von β. (Ist der Winkel ψ in Sekunden ausgedrückt, dann ist natürlich sein 1 296 000. Teil zu nehmen.)

2. Vergleicht man das Sphäroid mit den Halbachsen a und b mit der inhaltsgleichen Kugel vom Halbmesser $\sqrt[3]{a^2b}$, so ist das Volumen, das einer vollen Umdrehung des durch die geozentrische Breite β bestimmten Meridianausschnittes um die kleine Achse b entspricht, gleich dem Volumen, das einer Umdrehung des Kreisausschnittes aus einem größten Kreise jener Kugel um die gleich gelegene Achse entspricht, dessen Zentriwinkel ψ gleich ist der reduzierten Breite von β.

Oder: Das Volumen des vom Äquator bis zu einem beliebigen Parallelkreise reichenden Rotationsausschnittes[1]) eines Sphäroides ist gleich dem halben Volumen des Sphäroides mal dem Sinus der reduzierten Breite jenes Parallelkreises.

Und ebenso auch: Das Volumen eines von gleichen Parallelkreisen begrenzten Rotationsausschnittes eines Sphäroides ist gleich dem Volumen des Sphäroides mal dem Sinus der beiden Parallelkreisen numerisch gemeinsamen reduzierten Breite.

Selbstverständlich gelten diese beiden Gesetze — noch allgemeiner — auch für Ausschnitte, die nicht an der großen Halbachse oder am Äquator beginnen; nur ist dann in beiden Fällen je die Differenz der reduzierten Breiten der Endpunkte des betreffenden Ellipsenbogens zu nehmen, wobei, wenn sich der Bogen zu beiden Seiten des Äquators erstreckt, die südliche Breite als negativ zu betrachten ist, so daß sich in diesem letzten Falle aus der Differenz der reduzierten Breiten deren Summe ergibt.

---

[1]) Der Ausdruck Rotations**ausschnitt** macht von vornherein ersichtlich, daß die Grenze des betreffenden Körpers im Innern des Sphäroides allenthalben geradlinig zum Mittelpunkt verläuft.

Dagegen gelten jene Regeln nicht für Ausschnitte, die den Pol überspannen, da auch die Guldinsche Regel nur insolange gilt, als die Erzeugende auf einer Seite der Drehungsachse liegt. Reicht sie auf die andere Seite hinüber, so erfordert der Begriff eines Rotationskörpers, daß alsdann die zu beiden Seiten der Drehungsachse gelegenen Teile der Erzeugenden kongruent sind. Dann entsteht derselbe Rotationskörper, wenn sich die ganze Erzeugende einhalbmal oder die Hälfte der Erzeugenden einmal um die Achse dreht; aber nur aus der ganzen Drehung der Hälfte läßt sich dann nach der Guldinschen Regel das Volumen des Rotationskörpers berechnen.

Da sich der vorhin provisorisch mit γ bezeichnete Winkel $A_m CQ$ als identisch mit dem Winkel $A_u CQ = \psi$ erwiesen hat, so liegt also der Punkt A_m in der Geraden $A_u C$. Und weil, wie wir vorhin gesehen haben, beim Übergang der Erde oder überhaupt irgend eines Sphäroides in die inhaltsgleiche Kugel alle Rotationsvolumina unverändert bleiben und unsere für einen beliebigen Punkt angestellte Entwicklung natürlich auch für jeden andern Punkt, also ganz allgemein gilt, so ergibt sich folgendes Gesetz:

Geht die Erde in die inhaltsgleiche Kugel über, so gelangt jeder Punkt der Erdoberfläche in der Ebene seines Meridianquadranten an denjenigen Punkt des entsprechenden Quadranten der Kugeloberfläche, dessen geozentrische Breite gleich ist der reduzierten Breite des Erdenpunktes.

Dies ist eine eminent geologische Bedeutung der „reduzierten“ Breite.

Demnach ist die Ortsveränderung, die die einzelnen Punkte eines beliebigen Meridianquadranten eines Sphäroides bei dessen Übergang in die inhaltsgleiche Kugel erfahren, graphisch sehr leicht darzustellen:

Man zeichnet den betreffenden Meridianquadranten des Sphäroides und konzentrisch dazu die entsprechenden Quadranten der inhaltsgleichen Kugel und des der Meridianellipse zu umschreibenden Kreises. Fällt man dann von einem Punkte des Meridianquadranten ein Lot auf die große Halbachse der Meridianellipse, verlängert es in entgegengesetzter Richtung bis zum Durchschnitt mit dem umschriebenen Kreise und verbindet dann diesen Durchschnittspunkt durch eine Gerade mit dem Mittelpunkt: so bezeichnet der Durchschnitt dieser Geraden mit dem Quadranten der inhaltsgleichen Kugel den Punkt, wohin der betreffende Punkt des Sphäroides gelangt, wenn dieses in die inhaltsgleiche Kugel übergeht.

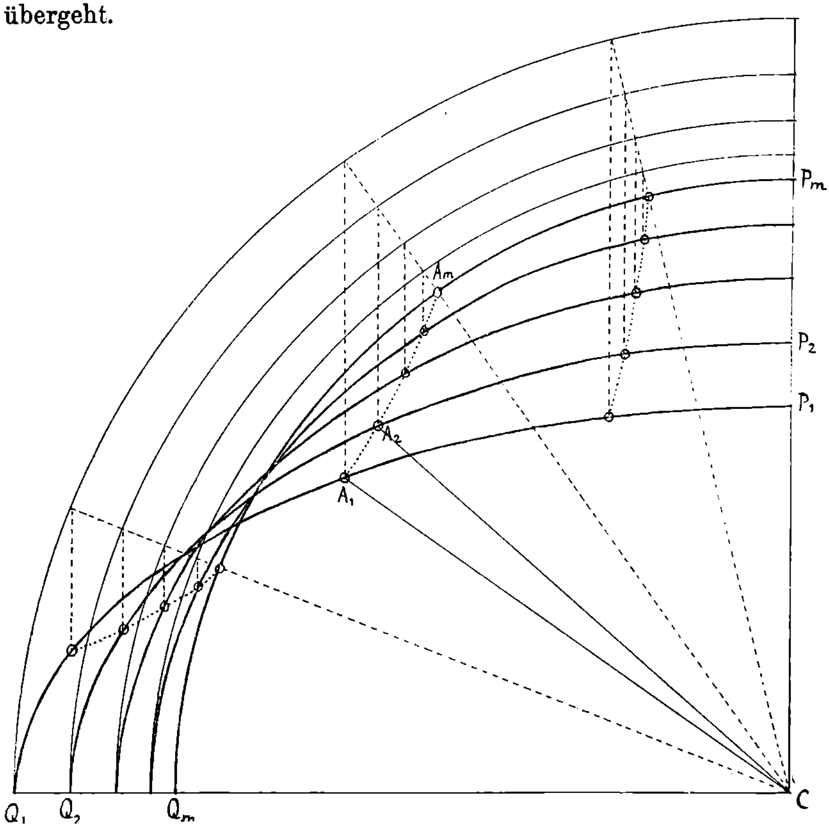

Fig. 2

Durch entsprechende Anwendung dieses Konstruktionsverfahrens läßt sich aber ganz allgemein und punktweise auch der Weg verfolgen, den ein beliebiger Punkt eines Sphäroides bei einer Gestaltsänderung dieses Sphäroides, also beim Übergange des Sphäroides in ein anders abgeplattetes, aber inhaltsgleiches Sphäroid, oder schließlich in die inhaltsgleiche Kugel zurücklegt.

Es seien in Fig. 2 Q_1P_1 und Q_2P_2 die Meridianquadranten zweier inhaltsgleichen Sphäroide, Q_mP_m der Quadrant der inhaltsgleichen Kugel; alle drei, versteht sich, konzentrisch. Der Punkt

A_1 gelangt zufolge der vorhin angegebenen Konstruktion beim Übergange seines Sphäroides in die inhaltsgleiche Kugel nach A_m. Bezüglich des Sphäroidquadranten $Q_2 P_2$ führen wir nun die Konstruktion umgekehrt durch, indem wir ermitteln, wohin der Punkt A_m der Kugel gelangte, wenn diese in das inhaltsgleiche Sphäroid mit dem Meridianquadranten $Q_2 P_2$ überginge.

Indem wir also von dem Durchschnittspunkte des verlängerten Radius CA_m mit dem der Ellipse des Meridianquadranten $Q_2 P_2$ umschriebenen Kreise ein Lot auf CQ_2 fällen, bis es jenen Meridianquadranten trifft, erhalten wir in diesem den Punkt A_2, der nun, wenn das betreffende Sphäroid wieder in die inhaltsgleiche Kugel überginge, natürlich wieder nach A_m gelangen müßte.

Da nun

$$\text{RotVol. } Q_1 A_1 C = \text{RotVol. } Q_m A_m C$$

$$\text{RotVol. } Q_2 A_2 C = \text{RotVol. } Q_m A_m C$$

so ist auch

$$\text{RotVol. } Q_1 A_1 C = \text{RotVol. } Q_2 A_2 C$$

das heißt, wenn das Sphäroid mit dem Meridianquadranten $Q_1 P_1$ in das inhaltsgleiche Sphäroid mit dem Meridianquadranten $Q_2 P_2$ übergeht, so gelangt der Punkt A_1 nach A_2, beschreibt also hiernach und dem vorigen zufolge beim Übergange des ersten Sphäroides in die inhaltsgleiche Kugel die Bahn $A_1 A_2 A_m$.

Auf diese Weise läßt sich bei einer unter Beibehaltung des Volumens vor sich gehenden und lediglich durch das Abplattungsverhältnis bezeichneten Gestaltsänderung eines Sphäroides der Weg eines beliebigen Punktes durch jedes dazwischen gelegene inhaltsgleiche Sphäroid und bis schließlich in die inhaltsgleiche Kugel verfolgen, wie dies in Fig. 2 noch für zwei weitere Sphäroide und zwei andere Punkte dargestellt ist. Bei der Einfachheit der Konstruktion ist eine weitere Erläuterung wohl entbehrlich.

Demnach läßt sich das vorhin aufgestellte Gesetz allgemeiner und kürzer auch folgendermaßen formulieren:

Ähnlich gelegene Punkte auf den Oberflächen inhaltsgleicher Sphäroide haben dieselbe reduzierte Breite; beim Übergang in die inhaltsgleiche Kugel fallen geographische und geozentrische Breite mit der reduzierten zusammen.

Es brauchte wohl kaum besonders bemerkt zu werden, daß jenes konstruktive Verfahren für das Erdsphäroid aus dem einzigen Grunde nicht gut durchführbar ist, weil sich der Meridianquadrant des Erdsphäroides so wenig von dem Quadranten der inhaltsgleichen Kugel und überhaupt eines Kreises unterscheidet, daß die Konstruktion, um deutlich zu sein, ins riesenhafte ausgedehnt werden müßte. Indessen erfüllt die Konstruktion, wenn auch stark übertriebenen Verhältnissen entsprechend durchgeführt, doch den Zweck, ein anschauliches Bild des betreffenden Vorganges zu entwerfen, wovon wir alsbald weiteren Gebrauch machen werden.

Für die numerische Auswertung stehen bezüglich der Beziehungen zwischen geographischer, geozentrischer und reduzierter Breite die bekannten Formeln zur Verfügung:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a}{b}\operatorname{tg}\psi \qquad \operatorname{tg}\psi = \frac{b}{a}\operatorname{tg}\varphi$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{a}{b}\operatorname{tg}\beta \qquad \operatorname{tg}\beta = \frac{b}{a}\operatorname{tg}\psi$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a^2}{b^2}\operatorname{tg}\beta \qquad \operatorname{tg}\beta = \frac{b^2}{a^2}\operatorname{tg}\varphi$$

II. Berechnungen

Der Meridianquadrant der Erde mißt nach den Besselschen Dimensionen des Erdsphäroides, die hier allen Angaben und Berechnungen zugrundeliegen, 10 000 856 *m*, der Meridianquadrant der inhaltsgleichen Kugel 10 006 418 *m*; dieser ist also um 5562 *m* länger als jener.

Mit Hilfe des auf S. 17 abgeleiteten Gesetzes ist es nun ein leichtes, zu berechnen, wohin Erdenpunkte von bestimmter geographischer Breite gelangen würden, wenn die Erde in die inhaltsgleiche Kugel überginge.

In der folgenden Tabelle ist das Resultat dieser Berechnungen für Punkte eines Erdmeridianquadranten zusammengestellt, deren Abstand voneinander je 5° geographischer Breite beträgt.

Tabelle I

Geographische Breite φ	Reduzierte Breite ψ			Länge des Meridianbogens in Metern		Verlängerung in Metern
				auf der Erde[1]) vom Äquator bis φ	auf der inhgl. Kugel vom Äquator bis ψ	
0°	0°	0′	0″	0	0	0
5	4	59	0·1	552 832	554 063	1 231
10	9	58	2·1	1 105 748	1 108 182	2 434
15	14	57	7·6	1 658 829	1 662 412	3 583
20	19	56	18·3	2 212 152	2 216 802	4 650
25	24	55	35·8	2 765 784	2 771 401	5 617
30	29	55	1·2	3 319 787	3 326 244	6 457
35	34	54	35·7	3 874 208	3 881 369	7 161
40	39	54	20·0	4 429 085	4 436 796	7 711
45	44	54	14·7	4 984 439	4 992 544	8 105
50	49	54	19·8	5 540 280	5 548 615	8 335
55	54	54	35·3	6 096 599	6 105 005	8 406
60	59	55	0·7	6 653 376	6 661 702	8 326
65	64	55	35·2	7 210 576	7 218 679	8 103
70	69	56	17·7	7 768 150	7 775 904	7 754
75	74	57	7·1	8 326 038	8 333 342	7 304
80	79	58	1·7	8 884 170	8 890 940	6 770
85	84	58	59·9	9 442 471	9 448 649	6 178
90	90			10 000 856	10 006 418	(5 562)

Ein Beispiel möge diese Tabelle erläutern. Der Meridianbogen vom Äquator bis zur geographischen Breite $\varphi = 35°$ mißt 3 874 208 *m*, die entsprechende reduzierte Breite ist $\psi = 34° 54' 35{\cdot}7''$. Geht die Erde in die inhaltsgleiche Kugel über, so gelangt ein Punkt, der auf der Erde die geographische Breite φ hat, auf der Kugel in die geozentrische Breite gleich jenem ψ, und der Meridianbogen vom Kugeläquator bis zu dieser geozentrischen Breite ψ auf der Kugel mißt alsdann 3 881 369 *m*. Der Meridianbogen vom Erdäquator bis zur geographischen Breite 35° wird also,

[1]) Die Erdmeridianbogenlängen sind H. Wagners Tabelle im Geographischen Jahrbuche, III, 1870, S. XXXII—XXXIII, entnommen.

wenn die Erde in die inhaltsgleiche Kugel übergeht, um 7161 *m* länger.

Aus dieser Tabelle läßt sich sofort eine zweite ableiten, worin die Längen der einzelnen Meridianabschnitte auf der Erde, Intervallen von je 5° geographischer Breite entsprechend, mit jenen Längen verglichen werden, die ihnen auf der inhaltsgleichen Kugel zukommen würden, wenn die Erde in diese überginge.

Tabelle II

Geographische Breite φ	Länge des Meridianbogens in Metern		Verlängerung bzw. Verkürzung	
	auf der Erde	auf der inhgl. Kugel	in Metern	$^0/_{00}$
0— 5°	552 832	554 063	1 231	2·226 7
5—10	552 916	554 119	1 203	2·175 7
10—15	553 081	554 230	1 149	2·077 5
15—20	553 323	554 390	1 067	1·928 4
20—25	553 632	554 599	967	1·746 7
25—30	554 003	554 843	840	1·516 2
30—35	554 421	555 125	704	1·263 3
35—40	554 877	555 427	550	0·991 21
40—45	555 354	555 748	394	0·709 46
45—50	555 841	556 071	230	0·413 79
50—55	556 319	556 390	71	0·127 62
55—60	556 777	556 697	— 80	— 0·143 68
60—65	557 200	556 977	— 223	— 0·400 22
65—70	557 574	557 225	— 349	— 0·625 93
70—75	557 888	557 438	— 450	— 0·806 61
75—80	558 132	557 598	— 534	— 0·956 76
80—85	558 301	557 709	— 592	— 1·060 4
85—90	558 385	557 769	— 616	— 1·103 2
	10 000 856	10 006 418	5 562	+ 1·798 068

Es zeigt sich aus der zweiten Tabelle noch weit deutlicher als aus der ersten, daß der Erdmeridianquadrant beim Übergange der Erde in die inhaltsgleiche Kugel zwar im ganzen verlängert würde, abschnittsweise dagegen nur — und zwar in ständig abnehmendem Maße — vom Erdäquator bis zur geographischen

Breite von 55° (genauer 55° 1′), worauf diese polwärts abnehmende Verlängerung in eine polwärts zunehmende Verkürzung überginge, deren Gesamteffekt jedoch derart hinter jenem der Verlängerung zurückbliebe, daß die algebraische Summe, wie natürlich, dem Überschusse der Länge des Kugelquadranten über die des Erdmeridianquadranten entspräche.

Die Länge einer Bogenminute eines größten Kreises der inhaltsgleichen Kugel ist 1 853·040 *m*. Die Bogenminute zwischen 48° 14′ und 48° 15′ geographischer Breite auf dem Besselschen Erdsphäroide mißt nach H. Hartls Meridian- und Parallelkreistafeln (Mitt. Mil.-Geogr. Inst. XIV, 1894, Wien 1895, S. 102) 1 853·041 *m*. Da die Meridianminuten auf der Kugel einander gleich sind, auf dem Sphäroid aber polwärts wachsen, könnte es prima vista unverständlich scheinen, daß sich beim Übergange der Erde in die inhaltsgleiche Kugel die Verlängerung der Meridianbögen noch über dieses Breitenintervall hinaus erstreckt. Die Erklärung liegt darin, daß die Grade, Minuten und Sekunden geographischer Breite der polwärts stetig vor sich gehenden Zunahme des Krümmungsradius wegen — worin eben ihr Wachstum begründet ist — nicht mit Winkelbogenlängen in mathematischem Sinne identifiziert werden dürfen. Die geographische Breite auf der Erde und die ihr entsprechende Bogenlänge auf der Kugel schreitet also nicht nach gleichen Winkelintervallen fort.

Im übrigen erkennt man, daß die Veränderungen der Meridianbogenlängen relativ gering sind, da sie im Maximum + 2·2 und — 1·1‰ betragen. Im ganzen resultiert eine Verlängerung des Erdmeridianquadranten um 5 562 *m* oder rund 1·8‰. Um diese Verlängerung wettzumachen, müßte sich der mittlere Erdhalbmesser um 3 541 *m* oder rund 0·56‰ verkürzen.

Ziehen wir nun Sphäroide von dem Inhalte der Erde, aber von verschiedener Abplattung in Betracht, so ergibt die Rechnung, daß, wenn das eine Sphäroid in das andere übergeht, sich der Meridianquadrant um fast gleiche Beträge verlängert, wenn die Abplattung um gleiche Beträge abnimmt. In der folgenden Tabelle sind für einige inhaltsgleiche Sphäroide, deren Abplattungen $\mathfrak{a}_1$ mit der heutigen der Erde verglichen eine arithmetische Reihe bilden, die Längen der beiden Halbachsen a_1 und b_1 sowie die Längen der Meridianquadranten Q_1 nebst deren ersten und zweiten Differenzen zusammengestellt:

Tabelle III

Abplattung $\mathfrak{a}_1$		Große Halbachse[1]) a_1 *m*	Kleine Halbachse[1]) b_1 *m*	Meridian-quadrant[2]) Q_1 *m*	$\triangle_1$ *m*	$\triangle_2$ *m*
$\frac{1}{24{\cdot}929\,401}$	$= \mathfrak{a} + 11\,\mathfrak{a}$	6 457 812	6 198 768	9 941 496		
					5 253	
$\frac{1}{27{\cdot}195\,710}$	$= \mathfrak{a} + 10\,\mathfrak{a}$	6 450 333	6 213 152	9 946 749		30
					5 283	
$\frac{1}{29\,915\,281}$	$= \mathfrak{a} + 9\,\mathfrak{a}$	6 442 889	6 227 518	9 952 032		29
					5 312	
$\frac{1}{33{\cdot}239\,201}$	$= \mathfrak{a} + 8\,\mathfrak{a}$	6 435 479	6 241 867	9 957 344		29
					5 341	
$\frac{1}{37{\cdot}394\,102}$	$= \mathfrak{a} + 7\,\mathfrak{a}$	6 428 102	6 256 201	9 962 685		29
					5 370	
$\frac{1}{42\,736\,116}$	$= \mathfrak{a} + 6\,\mathfrak{a}$	6 420 760	6 270 517	9 968 055		28
					5 398	
$\frac{1}{49{\cdot}858\,802}$	$= \mathfrak{a} + 5\,\mathfrak{a}$	6 413 451	6 284 818	9 973 453		28
					5 426	
$\frac{1}{59\,830\,563}$	$= \mathfrak{a} + 4\,\mathfrak{a}$	6 406 175	6 299 102	9 978 879		27
					5 453	
$\frac{1}{74{\cdot}788\,203}$	$= \mathfrak{a} + 3\,\mathfrak{a}$	6 398 932	6 313 371	9 984 332		28
					5 481	
$\frac{1}{99{\cdot}717\,604}$	$= \mathfrak{a} + 2\,\mathfrak{a}$	6 391 721	6 327 623	9 989 813		27
					5 508	
$\frac{1}{149{\cdot}576\,406}$	$= \mathfrak{a} + 1\,\mathfrak{a}$	6 384 543	6 341 859	9 995 321		27
					5 535	
$\frac{1}{299{\cdot}152\,813}$	$= \mathfrak{a} + 0\,\mathfrak{a}$	6 377 397	6 356 079	10 000 856		27
					5 562	
$\frac{1}{\infty}$	$= \mathfrak{a} - 1\,\mathfrak{a}$	6 370 283	6 370 283	10 006 418		

[1]) Die Halbachsen ergeben sich aus $\mathfrak{a}_1 = \frac{a_1 - b_1}{a_1}$ und $a_1{}^2 b_1 = a^2 b$ zu $a_1 = \sqrt[3]{\frac{a^2 b}{1 - \mathfrak{a}_1}}$ und $b_1 = \sqrt[3]{a^2 b\,(1 - \mathfrak{a}_1)^2}$.

[2]) Die Meridianquadranten sind nach der Formel berechnet

$$Q_1 = \frac{\pi}{2}\, a_1 \frac{1}{1 + n_1}\left(1 + \frac{1}{4}\, n_1{}^2 + \frac{1}{64}\, n_1{}^4 + \frac{1}{256}\, n_1{}^6 + \ldots\right)$$

wobei $n_1 = \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1}$.

Man sieht, daß die Längen der Meridianquadranten eine arithmetische Reihe höherer Ordnung bilden, bei der sich aber schon die zweiten Differenzen nur mehr sehr wenig ändern. Daß diese in der Tabelle keine durchaus stetig und gleichsinnig verlaufende Reihe bilden, ist natürlich lediglich in dem Fehlen der Dezimalstellen und der dadurch bedingten Korrektur der Einheiten begründet.

Richten wir jetzt unseren Blick in die Vergangenheit, und zwar auf jene Zeit, wo die Abplattung der Erde doppelt so groß war wie heute, also $\frac{1}{149 \cdot 576\,406}$. Ist die Erde seither lediglich infolge der Minderung ihrer Umdrehungsgeschwindigkeit durch die Gezeitenreibung und ohne Volumsänderung in ihre heutige Gestalt übergegangen, so hat damals, wie aus Tabelle III ersichtlich, ihre halbe große Achse 6 384 543 *m*, die halbe kleine 6 341 859 *m* und der Meridianquadrant 9 995 321 *m* gemessen. Durch jenen Übergang in die heutige Gestalt hätte sich also der Meridianquadrant um 5 535 *m* verlängert.

Sollte diese Verlängerung des Meridianquadranten beim Übergange von dem doppelt so stark wie heute abgeplatteten Sphäroide zum heutigen durch eine mit der Abkühlung verbundene Kontraktion der Erde wettgemacht worden sein, so müßte das doppelt so stark wie heute abgeplattete Sphäroid einen um jene 5 535 *m* längeren Meridianquadranten gehabt haben, nämlich die Meridianquadrantenlänge von heute. Die Rechnung ergibt alsdann für die Länge der großen Halbachse 6 388 078 *m*, für die der kleinen 6 345 371 *m* und für den Radius der diesem Sphäroide inhaltsgleichen Kugel 6 373 811 *m*. Der mittlere Erdradius müßte sich also seither infolge der Abkühlung von diesem Betrage auf den heutigen = 6 370 283 *m*, also um 3 528 *m* verkürzt haben.

Nach H. Hergesell[1]) entspricht unter den gegenwärtigen Verhältnissen die Abnahme der mittleren Temperatur des ganzen Erdkörpers einer Abkühlung um 42° C in 100 Millionen Jahren. Nimmt man den linearen Ausdehnungskoeffizienten der Erde zu 0·000 01 an, so wären etwa 132 Millionen Jahre nötig, damit sich

---

[1]) H. Hergesell: Die Abkühlung der Erde und die gebirgsbildenden Kräfte. Beiträge zur Geophysik, herausgegeben von G. Gerland, II, Stuttgart 1894, S. 181.

der Erdradius um jenen Betrag verkürze. Da die Wärmeausstrahlung in früheren Zeiten stärker war als heute, so ist dieser Zeitraum sicher etwas zu reduzieren.

Sollte anderseits die Erde lediglich infolge der Gezeitenreibung und unter Volumswahrung von der doppelten Abplattung $= \frac{1}{149 \cdot 576\,406}$ zur heutigen übergegangen sein, so ergibt sich der Überschlag wie folgt: Der doppelt so großen Abplattung wie heute würde mit Rücksicht auf die mit der Gestaltsänderung verbundene Änderung der Schwerkraft eine Fliehkraft entsprechen, die nicht ganz zweimal so groß ist wie heute. Heute beträgt die Fliehkraft am Äquator $0 \cdot 033\,912\, m$; sie mag also damals etwa $0 \cdot 067\, m$ gewesen sein. Daraus und aus der Größe der großen Halbachse $a_1 = 6\,384\,543\, m$ ergäbe sich eine Länge des Sterntages von $61\,335^s$ gegenüber seiner heutigen Länge von $86\,164^s$, so daß sich also die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde seither infolge der Gezeitenreibung um $24\,829^s$ oder $6^h\, 53^m\, 49^s$ verlängert hätte.

Nun bleibt infolge der Gezeitenreibung unter den gegenwärtigen Umständen nach J. C. Adams in einem Jahrhundert die astronomisch bestimmte Zeit gegen die durch die Anfangsgeschwindigkeit gegebene Zeit um 22^s zurück, so daß die Änderung der Jahreslänge im Jahrhundert $0 \cdot 44^s$ beträgt [1]). Daraus ergibt sich eine tägliche Verlängerung des Sterntages um $328\,073 \cdot 10^{-13\,s}$, so daß zu der Verlängerung des Sterntages um den angegebenen Betrag nicht weniger als 1974 Millionen Jahre erforderlich wären.

Diesem Zeitraume kommt jedoch in noch weit höherem Grade als dem vorigen der Charakter eines Maximalwertes zu, da die Gezeitenreibung in früheren Zeiten, als der Mond der Erde näher war, um ein Vielfaches stärker gewesen sein mußte als heute [2]).

---

1) Vgl. F. R. Helmert: Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. II, Leipzig 1884, S. 450. — Vgl. W. B. Taylor: Crumpling of the Earth's Crust. Am. J. Sci., 3. Ser., XXX, 1885, S. 255.

2) Nach S. Oppenheim (Astron. Nachr. 1886, CXIII, S. 208 — zitiert nach Geogr. Jahrb. XIII, 1889, S. 120) kann die säkulare Änderung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde unter günstigen Umständen — nach heutigen Verhältnissen? — den Wert von $2 \cdot 36^s$ pro Jahrhundert erreichen.

Im übrigen ist nicht zu verkennen, daß derartige Berechnungen — im Grunde genommen ja nur rechnerisch eingekleidete Schätzungen — höchstens dazu dienen können, den Rahmen der betreffenden Größenordnungen zu skizzieren, weil ja die Grundlagen, von denen dabei ausgegangen wird, mitunter recht unsicher sind.

Immerhin dürfte jedoch aus diesem Kalkül mit dem Anspruche auf einen gewissen Grad von Wahrscheinlichkeit die Folgerung gezogen werden, daß die Meridianverlängerung, die die Erde bei der Verringerung der Abplattung infolge der Gezeitenreibung erleidet, geringer ist als die Meridianverkürzung, die in derselben Zeit infolge der Kontraktion durch Abkühlung eintreten müßte. Danach käme also jene Meridianverlängerung als solche bei der Frage nach der Gebirgsbildung gar nicht in Betracht — höchstens die Differenzen, die ihrer Ungleichmäßigkeit entspringen.

Gleich den Meridianlängen werden beim Übergange der Erde in die inhaltsgleiche Kugel natürlich auch die Parallelkreislängen verändert. Denn die Parallelkreise werden ja mit ihren Meridiandurchschnittspunkten verschoben, also, wie wir gesehen haben, polwärts. Der Parallelkreis, der auf der Erde die geographische Breite φ hat, kommt, wenn die Erde in die inhaltsgleiche Kugel übergeht, in die Breite ψ [1]), wobei ψ die reduzierte Breite ist von φ. Daraus erhellt, daß sämtliche Parallelkreise bei diesem Übergange verkürzt werden.

Dabei wird zwar, wie wiederum selbstverständlich, jeder einzelne Parallelkreis seinem ganzen Umfange nach gleichmäßig verkürzt, aber die Verkürzungen der verschiedenen Parallelkreise sind absolut stark, relativ dagegen fast gar nicht verschieden. Die folgende Tabelle zeigt dies ganz deutlich.

Demnach würde sich der obige Zeitraum schon auf 385 Millionen Jahre verringern.

Nach G. H. Darwin (l. c., 1879) dagegen hätte der Sterntag vor nur 56 Millionen Jahren $6^3/_4{}^h$ und vor 46 Millionen Jahren $15^1/_2{}^h$ betragen — Zeiträume, die für Änderungen der Rotationsdauer solchen Ausmaßes wohl etwas gar zu kurz bemessen sein dürften.

[1]) Geographische und geozentrische Breite sind auf der nicht rotierenden Kugel dasselbe.

Tabelle IV

Geographische Breite φ	Reduzierte Breite ψ	Länge des Parallelkreisquadranten in Metern: auf der Erde[1]) Geogr. Breite $= \varphi$	auf der inhgl. Kugel Geoz. Breite $= \psi$	Verkürzung: in Metern	$^0/_{00}$
0°	0° 0′ 0″	10 017 592	10 006 418	11 174	1·115 4
5	4 59 0·1	9 979 725	9 968 593	11 132	1·115 5
10	9 58 2·1	9 866 395	9 855 389	11 006	1·115 5
15	14 57 7·6	9 678 415	9 667 618	10 797	1·115 6
20	19 56 18·3	9 417 134	9 406 630	10 504	1·115 4
25	24 55 35·8	9 084 438	9 074 303	10 135	1·115 6
30	29 55 1·2	8 682 736	8 673 051	9 685	1·115 4
35	34 54 35·7	8 214 955	8 205 792	9 163	1·115 4
40	39 54 20·0	7 684 524	7 675 952	8 572	1·115 5
45	44 54 14·7	7 095 356	7 087 441	7 915	1·115 5
50	49 54 19·8	6 451 831	6 444 635	7 196	1·115 3
55	54 54 35·3	5 758 765	5 752 342	6 423	1·115 3
60	59 55 0·7	5 021 380	5 015 778	5 602	1·115 6
65	64 55 35·2	4 245 270	4 240 534	4 736	1·115 6
70	69 56 17·7	3 436 360	3 432 528	3 832	1·115 1
75	74 57 7·1	2 600 854	2 597 953	2 901	1·115 4
80	79 58 1·7	1 745 194	1 743 248	1 946	1·115 1
85	84 58 59·9	875 997	875 021	976	1·114 2
90	90 0 0				

[1]) Die Längen der Parallelkreisquadranten sind den Parallelgradlängen in H. **Hartls** Tabelle in Mitt. Mil.-Geogr. Inst., XIV, 1894, Wien 1895, S. 64—111, entnommen.

Mit Hilfe der reduzierten Breite gestaltet sich übrigens die Berechnung der Parallelkreisumfänge und -grade viel einfacher als bei dem üblichen Verfahren mit Hilfe der sogenannten Normalen (Verlängerung der Lotrichtung) bis zur Erdachse. Ist u_φ der Umfang und r_φ der Halbmesser des Parallelkreises von der geographischen Breite φ, N_φ die Normale bis zur Erdachse, ψ die reduzierte Breite von φ und $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ die numerische Exzentrizität der Meridianellipse, so wird gewöhnlich nach der Formel gerechnet

$$u_\varphi = 2\pi r_\varphi = 2\pi N_\varphi \cos\varphi$$

Man sieht: Die Verkürzungen, die die einzelnen Parallelkreise erleiden, sind relativ ungefähr von derselben Größenordnung wie die Längenveränderungen der einzelnen Meridianabschnitte, doch bleibt ihr relatives Maximum und Minimum hinter jenem bei den Meridianabschnitten zurück. Die Promillezahlen der Verkürzungen unterscheiden sich voneinander — von der Umgebung des Poles abgesehen — erst in der vierten Dezimalstelle. Die Verkürzung der einzelnen Parallelkreise ist also viel gleichmäßiger als die Längenänderung der Meridianabschnitte, erfolgt aber dabei doch insofern unregelmäßiger, als in derselben Richtung ihr Tempo mehrmals wechselt. Diese Unstetigkeit findet ihre Erklärung in der Ungleichmäßigkeit der Verschiebung entsprechend dem jeweiligen Unterschiede zwischen geographischer und reduzierter Breite — zum Teil freilich ist auch die Korrektur der letzten Stelle daran Schuld.

In früheren Zeiten, als die Abplattung der Erde größer war als heute, war das Tempo der mit der Gestaltsänderung verbundenen Parallelkreisverkürzung um ein geringes rascher. In der folgenden Tabelle sind für den Äquator- und die Parallelkreisquadranten von 35° und von 70° geographischer Breite die Verkürzungen und beziehungsweise die Ortsveränderungen zusammengestellt, die einem Übergange der Erde — unter Beibehaltung ihres Volumens — von der 10fachen heutigen Abplattung durch die 9-, 8fache usw. zur heutigen und weiterhin zur Kugel entsprechen würden.

---

wobei jedoch die Berechnung von

$$N_\varphi = \frac{a}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2\varphi}}$$

recht umständlich ist.

Nun liegt der Punkt A in Fig. 1, S. 10, in der geographischen Breite φ. Der (nicht eingezeichnete) Halbmesser seines Parallelkreises ist, wie man ohne weiteres sieht, $r_\varphi = FC$. In dem rechtwinkligen Dreiecke $A_u FC$ ist aber $FC = A_u C \cos\psi$, also einfach $r_\varphi = a \cos\psi$ und

$$u_\varphi = 2\pi a \cos\psi$$

wobei

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{b}{a} \operatorname{tg}\varphi$$

In die geographischen Lehr- und Handbücher scheint diese Formel keinen Eingang gefunden zu haben; dagegen findet sie sich bei E. Haentzschel: Das Erdsphäroid und seine Abbildung, Leipzig 1903, S. 45—46.

Tabelle V

Abplattung a_1	Geographische Breite φ_1	Reduzierte Breite ψ	Länge des Quadranten in Metern	Verkürzung in Metern $\triangle_1$	$\triangle_2$	‰ vom vorhergehenden
Äquator						
10 a			10 120 466	11 640		1·150 1
9 a			10 108 826	11 587	53	1·146 2
8 a			10 097 239	11 533	54	1·142 2
7 a			10 085 706	11 481	52	1·138 3
6 a			10 074 225	11 430	51	1·134 6
5 a	0° 0′ 0″	0° 0′ 0″	10 062 795	11 377	53	1·130 6
4 a			10 051 418	11 326	51	1·126 8
3 a			10 040 092	11 275	51	1·123 0
2 a			10 028 817	11 225	50	1·119 3
1 a			10 017 592	11 174	51	1·115 4
0 a			10 006 418			

Parallelkreis von 35° heutiger geographischer Breite

Abplattung a_1	Geographische Breite φ_1	Reduzierte Breite ψ	Länge des Quadranten in Metern	Verkürzung in Metern $\triangle_1$	$\triangle_2$	‰ vom vorhergehenden
10 a	35° 49′ 45·66″		8 299 317	9 545		1·150 1
9 a	35 44 7·88		8 289 772	9 502	43	1·146 2
8 a	35 38 31·62		8 280 270	9 458	44	1·142 2
7 a	35 32 56·90		8 270 812	9 415	43	1·138 3
6 a	35 27 23·68		8 261 397	9 372	43	1·134 4
5 a	35 21 51·96	34° 54′ 35·68″	8 252 025	9 330	42	1·130 6
4 a	35 16 21·75		8 242 695	9 288	42	1·126 8
3 a	35 10 53·02		8 233 407	9 247	41	1·123 1
2 a	35 5 25·77		8 224 160	9 205	42	1·119 3
1 a	35		8 214 955	9 163	42	1·115 4
0 a	34 54 35·68		8 205 792			

Abplattung a_1	Geographische Breite φ_1	Reduzierte Breite ψ	Länge des Quadranten in Metern	Verkürzung in Metern $\triangle_1$	Verkürzung $\triangle_2$	Verkürzung ‰ vom vorhergehenden
Parallelkreis von 70° heutiger geographischer Breite						
10 a	70° 33′ 28·11″		3 471 649			
				3 993		1·150 2
9 a	70 29 44·30		3 467 656		18	
				3 975		1·146 3
8 a	70 26 0·65		3 463 681		19	
				3 956		1·142 1
7 a	70 22 17·19		3 459 725		17	
				3 939		1·138 5
6 a	70 18 33·89		3 455 786		19	
				3 920		1·134 3
5 a	70 14 50·76	69° 56′ 17·74″	3 451 866		17	
				3 903		1·130 7
4 a	70 11 7·81		3 447 963		18	
				3 885		1·126 8
3 a	70 7 25·04		3 444 078		17	
				3 868		1·123 1
2 a	70 3 42·43		3 440 210		18	
				3 850		1·119 1
1 a	70		3 436 360		18	
				3 832		1·115 1
0 a	69 56 17·74		3 432 528			

Die reduzierte Breite eines und desselben Parallelkreises ist natürlich auf allen inhaltsgleichen Sphäroiden dieselbe und fällt auf der inhaltsgleichen Kugel, wie schon bemerkt, mit der geographischen und der geozentrischen Breite zusammen.

Man sieht, daß sich die zweiten Differenzen der Verkürzung mit der Verringerung der Abplattung so wenig ändern, daß man mit ihrer Hilfe die Verkürzung für jedes beliebige, dem heutigen benachbarte und inhaltsgleiche Sphäroid interpolieren kann. Man begeht sogar nur einen geringen Fehler, wenn man die Verkürzung der Parallelkreise einfach der Abplattung proportional setzt.

War die Erde einst 10mal so stark abgeplattet wie heute, so resultierte bisher insgesamt allein aus der Gestaltsveränderung eine Verkürzung des Äquators um 411 *km*, des 35. Parallels um 337 *km*, des 70. Parallels um 141 *km*.

Nun ist eine Abplattung von $10\,\alpha = \frac{1}{29{\cdot}915}$ noch immer sehr gering; auf einer Figur im Rahmen der vorliegenden Schrift würde sie überhaupt kaum bemerkbar sein — würde doch auf einem Globus von 1 *m* Durchmesser der Unterschied der beiden Halbachsen nur etwas über $1^1/_2$ *cm* betragen. Eine solche Abplattung würde etwa einer 3mal so raschen Umdrehung entsprechen wie heute, also einer Tagbslänge von rund 8 Stunden[1]). Da nach G. H. Darwin der Tag einst noch viel kürzer gewesen sein soll und Jupiter und Saturn Abplattungen von $\frac{1}{14}$ und $\frac{1}{10}$ aufweisen, so ist es gar nicht unwahrscheinlich, daß die Abplattung der Erde in den frühesten geologischen Zeiten wirklich 10mal so groß war wie heute. Dann hätten wir allein infolge der Abplattungsverringerung mit Verkürzungen der Parallelkreise um die vorhin bezeichneten Beträge zu rechnen.

Aber selbst wenn die Abplattung nicht ganz so groß gewesen sein sollte, sind die erübrigenden Verkürzungen noch immer sehr beträchtlich.

---

[1]) Bei der 10fachen Abplattung mochte die Fliehkraft am Aquator etwa 9mal so groß gewesen sein wie heute. Bei einer Steigerung der Abplattung um das *n*-fache muß nämlich der entsprechende Koeffizient der Fliehkraft immer mehr und mehr hinter dem der Abplattung zurückbleiben, weil infolge der Gestaltsänderung und der damit verbundenen Änderung der Dichteverteilung das Verhältnis von Fliehkraft zu Schwerkraft am Äquator den Wert der Abplattung immer mehr und mehr übertrifft.

Dies stimmt mit dem Ergebnisse einer ähnlichen Schätzung überein, die B. Peirce (The Contraction of the Earth. Proc. Am. Acad. Arts and Sci., VIII, 1873, S. 106—108) vorgenommen hat. Nach Peirce wäre, wenn die Erde einst 4·236mal rascher rotiert hätte als heute, ihre große Halbachse um etwa $2^1/_2$% größer gewesen als heute. Demnach hätte die Umdrehungszeit $5^h\,39^m\,2^s$ und die Länge der großen Halbachse 6 536 832 *m* betragen. Daraus wiederum folgt — bei unverändertem Volumen — eine Länge der kleinen Halbachse von 6 049 809 *m*, eine Abplattung von $\frac{1}{13{\cdot}422}$ und eine Fliehkraft am Äquator von 0·623 72 *m*. Hiernach würde also einer 22·3mal so großen Abplattung wie heute eine 18·4mal so große Fliehkraft wie heute entsprochen haben.

Zu einem entsprechenden Resultate gelangt auch Ch. S. Slichter (Note on the Pressure within the Earth. Journ. of Geol., VI, Chicago 1898, S. 66), der für ein Sphäroid von der Abplattung $\frac{1}{12}$ und einer Rotationszeit von $5^1/_2{}^h$ eine Fliehkraft am Äquator von 0·661 6 *m* findet. Danach würde einer 25mal so großen Abplattung wie heute eine nur $19^1/_2$mal so große Fliehkraft entsprechen.

Dabei ist im Auge zu behalten, daß diese Verkürzungen — von der des Äquators abgesehen — zum größten Teile auf der polwärts erfolgenden Verschiebung der Parallelkreise beruhen.

Wir haben (Tabelle II und III) gesehen, daß durch die Verringerung der Abplattung die Meridianbogen vom Äquator bis etwa zum 55. Breitengrade in mit der Breite abnehmendem Maße verlängert, dann aber bis zum Pole in zunehmendem Maße verkürzt werden, jedoch derart, daß im ganzen für jede Verringerung der Abplattung um ihren heutigen Wert eine Verlängerung des Meridianquadranten um rund $5^1/_4$ bis $5^1/_2$ *km* resultiert. Wir haben weiter gesehen, daß, wenn sich die Erde bei der Abkühlung, wie allgemein angenommen wird, zusammenzieht, die mit der Verringerung der Abplattung verbundene Verlängerung des Meridianquadranten geringer ist als die Kontraktion, die alsdann in der entsprechenden Zeit durch die Abkühlung der Erde bewirkt wird, so daß also aus dem Zusammenwirken beider Vorgänge allenthalben eine Verkürzung resultierte. Diese Verkürzung müßte dann am stärksten sein in der Umgebung der Pole, wo die beiden Vorgänge Hand in Hand arbeiteten, und am schwächsten in den äquatorialen Gegenden, wo sie einander entgegenwirkten, jedoch die Kontraktion obsiegte.

Bei den Parallelkreisen dagegen würden beide Vorgänge durchaus in demselben Sinne wirken, wodurch der Gesamteffekt entsprechend verstärkt würde.

Nun wollen wir noch sehen, wie sich die Zonenflächen der Erde verhalten würden, wenn diese in die inhaltsgleiche Kugel überginge (s. Tabelle VI).

Da die Kugel unter allen Körperformen bei größtem Inhalt die kleinste Oberfläche hat, kann es nicht wundernehmen, daß die Oberfläche der inhaltsgleichen Halbkugel um 508 (genauer 508·6) km^2 kleiner ist als die des halben Erdsphäroides; die relative Geringfügigkeit der Differenz führt recht deutlich vor Augen, um wie wenig die Erde von der Kugelgestalt abweicht. Der Halbmesser der Kugel, die mit dem Erdsphäroide gleiche Oberfläche hat, mißt 6 370 289·510 *m*, der Halbmesser der inhaltsgleichen Kugel 6 370 283·157 *m*; dieser ist also nur um 6·353 *m* kürzer als jener.

Tabelle VI

Geographische Breite φ	Reduzierte Breite ψ	Flächeninhalt der Zone in Quadratkilometern		Vergrößerung bzw. Verkleinerung in Quadratkilometern
		auf der Erde[1]) vom Äquator bis φ	auf der inhgl. Kugel vom Äquator bis ψ	
5°	4° 59′ 0·1″	22 124 279	22 148 758	+ 24 479
10	9 58 2·1	44 084 604	44 132 381	+ 47 777
15	14 57 7·6	65 717 971	65 786 472	+ 68 501
20	19 56 18·3	86 863 290	86 948 956	+ 85 666
25	24 55 35·8	107 362 366	107 460 942	+ 98 576
30	29 55 1·2	127 060 922	127 167 416	+ 106 494
35	34 54 35·7	145 809 654	145 918 987	+ 109 333
40	39 54 20·0	163 465 315	163 572 483	+ 107 168
45	44 54 14·7	179 891 848	179 992 364	+ 100 516
50	49 54 19·8	194 961 529	195 051 477	+ 89 948
55	54 54 35·3	208 556 119	208 632 686	+ 76 567
60	59 55 0·7	220 568 005	220 629 465	+ 61 460
65	64 55 35·2	230 901 303	230 947 188	+ 45 885
70	69 56 17·7	239 472 889	239 503 847	+ 30 958
75	74 57 7·1	246 213 343	246 231 382	+ 18 039
80	79 58 1·7	251 067 767	251 075 769	+ 8 002
85	84 58 59·9	253 996 449	253 998 113	+ 1 664
90	90	254 975 357	254 974 849	— 508

Die Arealveränderungen, die auf der Oberfläche der Erde beim Übergange zur inhaltsgleichen Kugel vor sich gehen, sind gewissermaßen die Resultierenden aus den Längenveränderungen der betreffenden Meridian- und Parallelkreisbogen. Deren Verhalten spiegelt sich in dem der Zonenflächen deutlich wieder. Wir sehen, daß die vom Äquator an gerechneten Zonen bis in die nächste Nähe des Poles auf der inhaltsgleichen Kugel größer sind als auf der Erde, daß das Maximum dieses Überschusses bei 35° geographi-

[1]) Die Flächeninhalte der Zonen der Erde sind H. Wagners Tabelle im Geographischen Jahrbuche, III, 1870, S. XXXVI—XLIII, entnommen. Der Flächeninhalt der der Erdenzone vom Äquator bis zur geographischen Breite φ entsprechenden Zone auf der inhaltsgleichen Kugel ergibt sich aus der Formel $F = 2\pi R_m{}^2 \sin\psi$. Die Höhe der Zone, vom Äquator an gemessen, ist nämlich $h = R^m \sin\psi$.

scher Breite erreicht wird[1]), worauf der Überschuß wieder abnimmt und kurz vor dem Pole (12·7 *km* davor) in das Gegenteil umschlägt.

Daraus folgt, daß die zwischen den aufeinander folgenden Parallelkreisen gelegenen Zonen beim Übergange der Erde in die inhaltsgleiche Kugel bis zum 35.° geographischer Breite größer werden, von da an aber bis zum Pole kleiner, wie dies die folgende Tabelle zeigt, die sich unmittelbar aus der vorigen ergibt.

Tabelle VII

Geographische Breite φ	Fläche der Zone in Quadratkilometern		Vergrößerung bzw. Verkleinerung	
	auf der Erde	auf der inhgl. Kugel	in Quadratkilometern	‰
0— 5°	22 124 279	22 148 758	+ 24 479	+ 1·106 4
5—10	21 960 325	21 983 623	+ 23 298	+ 1·060 9
10—15	21 633 367	21 654 091	+ 20 724	+ 0·957 96
15—20	21 145 319	21 162 484	+ 17 165	+ 0·811 76
20—25	20 499 076	20 511 986	+ 12 910	+ 0·629 78
25—30	19 698 556	19 706 474	+ 7 918	+ 0·401 96
30—35	18 748 732	18 751 571	+ 2 839	+ 0·151 42
35—40	17 655 661	17 653 496	— 2 165	— 0·128 40
40—45	16 426 533	16 419 881	— 6 652	— 0·404 95
45—50	15 069 681	15 059 113	— 10 568	— 0·701 27
50—55	13 594 590	13 581 209	— 13 381	— 0·984 29
55—60	12 011 886	11 996 779	— 15 107	— 1·257 7
60—65	10 333 298	10 317 723	— 15 575	— 1·507 3
65—70	8 571 586	8 556 659	— 14 927	— 1·741 5
70—75	6 740 454	6 727 535	— 12 919	— 1·916 6
75—80	4 854 424	4 844 387	— 10 037	— 2·067 6
80—85	2 928 682	2 922 344	— 6 338	— 2·164 1
85—90	978 908	976 736	— 2 172	— 2·218 8
	254 975 357	254 974 849	+ 109 347	
			— 109 855	
			— 508	

[1]) Bis 34° 30′ geographischer Breite beträgt der Überschuß 109 290, bis 35° 101 347, bis 35° 30′ 109343, bis 36° geographischer Breite 109285 km^2. Das Maximum wird also zwischen 35 und 35½° geographischer Breite erreicht. In dieser Gegend liegen auch die Schnittparallele des Erdsphäroides mit der oberflächengleichen ($\varphi = 35° \, 22' \, 55·27''$) und mit der inhaltsgleichen Kugel ($\varphi = 35° \, 24' \, 0·54''$).

Tabelle VIII

Abplattung[1]) $\mathfrak{a}_1$	Oberfläche des Halbsphäroides in Quadratkilometern[2])	Verminderung		
		Quadratkilometer $\triangle_1$	$\triangle_2$	‰ von der vorigen
10 a	255 027 620			
		10 200		0·040 00
9 a	255 017 420		1 110	
		9 090		0·035 65
8 a	255 008 330		1 150	
		7 940		0·031 14
7 a	255 000 390		1 090	
		6 850		0·026 86
6 a	254 993 540		1 080	
		5 770		0·022 63
5 a	254 987 770		1 080	
		4 690		0·018 39
4 a	254 983 080		1 070	
		3 620		0·014 20
3 a	254 979 460		1 070	
		2 550		0·010 00
2 a	254 976 910		1 000	
		1 550		0·006 079
1 a	254 975 360		1 040	
		510		0·000 199 2
0 a	254 974 850			
		52 770		

[1]) Die numerischen Werte der Abplattungen und die Längen der entsprechenden Halbachsen sind aus Tabelle III zu ersehen.

[2]) Die Oberflächen sind nach der Formel berechnet:

$$\frac{1}{2}\,O_1 = 2\,\pi a_1^{\,2}\left(1 - \frac{2}{3}\,\mathfrak{a}_1 + \frac{1}{15}\,\mathfrak{a}_1^{\,2} + \frac{4}{105}\,\mathfrak{a}_1^{\,3} + \frac{29}{105}\,\mathfrak{a}_1^{\,4} + \ldots\right)$$

die sich aus der bekannten Formel

$$\frac{1}{2}\,O = 2\,\pi a^2\left(1 - \frac{\varepsilon^2}{3} - \frac{\varepsilon^4}{15} - \frac{\varepsilon^6}{35} - \ldots\right)$$

(Helmert, Theorien, I, S. 62) ergibt, wenn man, dem Vorgange J. C. E. Schmidts (Lehrb. d. math. u. phys. Geogr., I, Göttingen 1829, S. 207) folgend, statt der numerischen Exzentrizität die Abplattung einführt.

Wie zu erwarten, ist die Vergrößerung am Äquator absolut am größten, die Verkleinerung dagegen ist zwischen 60 und 65° geographischer Breite am größten und am Pole am kleinsten. Weit mehr als das absolute interessiert uns jedoch hier das relative Ausmaß der Veränderung, wie es die Promillezahlen anzeigen. An diesen sieht man deutlich, wie die relative Vergrößerung der Zonenflächen gleichfalls am Äquator am stärksten ist, bis 35° stetig abnimmt und weiterhin in eine polwärts ebenso stetig wachsende Verkleinerung übergeht, deren Maximum dann natürlich in der letzten Zone um den Pol selbst herum erreicht wird. Es zeigt sich ferner, daß die Arealverringerungen der polaren Seite relativ beträchtlicher sind als die Arealvergrößerungen der äquatorialen Seite und diese bis zu 2mal übertreffen.

Blicken wir nunmehr wieder in die Vergangenheit zurück und verfolgen wir die Größenänderungen der Erdoberfläche, wie sie erfolgt wären, wenn die Erde von 10mal so starker Abplattung wie heute — aber bei gleichem Volumen — in ihre heutige Gestalt übergegangen wäre (s. Tabelle VIII).

Infolge des Überganges von der 10fachen Abplattung zur heutigen wäre also die Oberfläche des Halbsphäroides um 52 260 km^2 oder 0·204 92 ‰ kleiner geworden, und zwar mit der Verringerung der Abplattung in stets geringerem Maße. Nun sind 0·2 ‰ nicht viel, und man könnte hieraus schließen wollen, daß die durch den Wechsel der Abplattung bedingte Größenänderung der Oberfläche geologisch völlig bedeutungslos sei. Das wäre sie auch in der Tat, wenn sie auf der ganzen Erdoberfläche gleichmäßig erfolgte, was aber, wie ein Blick auf die Tabellen VI und VII zeigt, nicht der Fall ist. Jene Gesamtverringerung der Erdoberfläche ist nur die Differenz aus den Veränderungen der einzelnen Zonen; diese aber erreichen innerhalb einer fünfgradigen Zone beim Wechsel der Abplattung um den einfachen Wert Beträge, die die Größenänderung des ganzen Halbsphäroides bis zum 50fachen übertreffen.

In der folgenden Tabelle sind die Größen verzeichnet, die der heute vom Äquator bis 35° geographischer Breite reichenden Zone auf den inhaltsgleichen Sphäroiden vom 10fachen Betrage der heutigen Abplattung bis hinab zur Kugel zukommen würden.

Tabelle IX

Abplattung	Geographische Breite φ_1 entsprechend der heutigen geographischen Breite $\varphi = 35°$ φ_1	Geozentrische Breite β_1 entsprechend der heutigen geographischen Breite $\varphi = 35°$ β_1	Oberfläche der Zone vom Äquator bis φ_1 in Quadratkilometern	Vergrößerung		
				Quadratkilometer $\triangle_1$	$\triangle_2$	‰ von der vorigen
10 a	35° 49′ 45·66″	34° 0′ 4·29″	144 826 841			
				109 063		0·753 06
9 a	35 44 7·88	34 5 34·63	144 935 904		46	
				109 109		0·752 75
8 a	35 38 31·62	34 11 4·28	145 045 013		40	
				109 149		0·752 52
7 a	35 32 56·90	34 16 33·20	145 154 162		37	
				109 186		0·752 21
6 a	35 27 23·68	34 22 1·39	145 263 348		9	
				109 195		0·751 70
5 a	35 21 51·96	34 27 28·89	145 372 543		54	
				109 249		0·751 51
4 a	35 16 21·75	34 32 55·67	145 481 792		11	
				109 260		0·750 79
3 a	35 10 53·02	34 38 21·74	145 591 052		32	
				109 292		0·750 68
2 a	35 5 25·77	34 43 47·10	145 700 344		18	
				109 310		0·750 24
1 a	35	34 49 11·75	145 809 654		23	
				109 333		0·749 83
0 a	34 54 35·68	34 54 35·68	145 918 987			
				1 092 146		

Die Berechnung erfolgte auf folgende Weise: Nach dem auf S. 17 entwickelten Gesetze bleibt beim Übergang eines Sphäroides in ein anders abgeplattetes, aber inhaltsgleiches Sphäroid die reduzierte Breite eines jeden Parallelkreises unverändert. Die reduzierte Breite ψ des Erdenparallels von der geographischen Breite φ (in unserem Falle 35°) ergibt sich aus $\operatorname{tg}\psi = \frac{b}{a} \operatorname{tg}\varphi$. Aus ψ und den Längen a_1 und b_1 der Halbachsen des betreffenden Sphäroides ergibt sich dann die der geographischen Breite φ auf der Erde entsprechende geographische Breite φ_1 auf dem betreffenden Sphäroide aus $\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{a_1}{b_1} \operatorname{tg}\psi$; die numerische Exzentrizität ε_1 dieses Sphäroides aber ist $\varepsilon_1 = \sqrt{1 - \frac{b_1^2}{a_1^2}}$. Dann ergibt sich der Flächeninhalt Z_1 der vom Äquator bis zur geographischen Breite φ_1 auf dem betreffenden Sphäroide reichenden Zone aus der Formel

$$Z_1 = 2\pi b_1^2 (\sin\varphi_1 + \tfrac{2}{3}\,\varepsilon_1^2 \sin^3\varphi_1 + \tfrac{3}{5}\,\varepsilon_1^4 \sin^5\varphi_1 + \tfrac{4}{7}\,\varepsilon_1^6 \sin^7\varphi_1 + \\ + \tfrac{5}{9}\,\varepsilon_1^8 \sin^9\varphi_1 + \tfrac{6}{11}\,\varepsilon^{10} \sin^{11}\varphi_1 + \ldots\ldots)$$

Bei Berechnungen auf der Erde ist die Berücksichtigung des Gliedes mit $\varepsilon^{10} \sin^{11}\varphi$ nicht mehr nötig, wohl aber bei den stärker abgeplatteten Sphäroiden. Trotzdem nun aber die Rechnung bezüglich der ersten beiden Glieder, die für Quadratkilometer 9- und 7stellige Zahlen ergeben, mit 12 und 10stelligen Logarithmen durchgeführt wurde[1]), so zeigt doch ein Blick auf die zweiten Differenzen in der vorstehenden Tabelle, daß die Einheiten und zum Teil auch die Zehner der Quadratkilometer nicht genau sind. Es kommt dies daher, weil der großen Umständlichkeit wegen auf die eigene Berechnung mehrstelliger Logarithmen der trigonometrischen Funktionen verzichtet werden mußte, weshalb deren der 7stelligen Tafel von L. Schrön entnommenen Werte (mehrstellige Tafeln standen nicht zur Verfügung) mit einem möglichen Fehler von $\frac{1}{4}$ Einheiten der 7. Mantisse behaftet sind, der sich beim Übergange von log tg zu log sin noch vergrößerte. Aus diesem Grunde sind die Arealangaben der Tabelle trotz der ansonst scharfen Rechnung bis zu 10, ja 20 km^2 unsicher.

[1]) Diese sowie die entsprechenden Zahlen wurden mit Hilfe der in Schröns Logarithmenwerk enthaltenen „Tafel zur Berechnung der Logarithmen der Zahlen“ gewonnen.

Beim Übergange von der 10fachen Abplattung zur heutigen wäre also die Zone vom Äquator bis 35° heutiger geographischer Breite insgesamt um 982 813 *km*² oder 6·786 1‰ der ursprünglichen Oberfläche (bei 10facher Abplattung) größer geworden, die Zone von da bis zum Pol also, wie eine einfache Rechnung aus Tabelle VIII und IX ergibt, um 1 035 073 *km*² oder 9·392 6‰ kleiner. Das wären immerhin schon Beträge von einiger Bedeutung.

Es zeigt sich ferner, daß die Oberfläche der Zone vom Äquator bis zu dem der heutigen geographischen Breite von 35° entsprechenden Parallelkreise bei jeder Verminderung der Abplattung um den Betrag ihres heutigen Wertes im Durchschnitte um rund 109 200 *km*² größer wird, die erübrigende Zone bis zum Pole um rund 114 500 *km*² kleiner. Die von der Größe der jeweiligen Abplattung abhängigen Abweichungen vom Durchschnitte sind, wie man aus der Tabelle ersieht, kaum von Belang und übersteigen nicht $\frac{1}{2}$‰.

Eine Berechnung, die in ähnlicher Weise für die vom Äquator bis 5° heutiger geographischer Breite reichende Zone durchgeführt wird, ergibt, daß diese Zone auf dem 10mal so stark wie heute abgeplatteten Sphäroide 21 901 141 *km*², auf dem 9mal so stark abgeplatteten 21 926 155 und auf dem 2mal so stark wie heute abgeplatteten Sphäroide 22 099 704 *km*² messen würde. Beim Übergange von der 10fachen zur 9fachen Abplattung würde sie also um 25 014, und bei dem von der doppelten zur heutigen um 24 575 *km*² vergrößert werden, während die Vergrößerung beim Übergange von der heutigen Abplattung zur inhaltsgleichen Kugel nach Tabelle VII 24 479 *km*² betragen würde. Daraus folgt, daß sich auch hier, bei den Zonenflächen, die zweiten Differenzen der durch den Abplattungswechsel bedingten Größenänderungen, ähnlich, wie wir es bei den Meridianbögen und den Parallelkreisen gesehen haben, im allgemeinen so wenig ändern, daß man jene Änderungen innerhalb gewisser Grenzen, ohne einen besonders groben Fehler zu begehen, der Abplattung proportional setzen könnte.

Auch hier ist darauf hinzuweisen, daß unter der Annahme einer mit der Abkühlung erfolgenden Kontraktion der Erde zumindest die Möglichkeit gegeben wäre, daß die bis 35° heutiger geographischer Breite aus der Verringerung der Abplattung erwachsende Vergrößerung der einzelnen Zonen durch eine aus jenem Grunde gleichzeitig erfolgende Verkleinerung aufgehoben, ja überboten werde. Zwischen 35° und dem Pole würden sich beide Vorgänge in der Verkleinerung der Zonen unterstützen.

Ginge nämlich die Erde infolge der Gezeitenreibung von der heutigen Abplattung zur inhaltsgleichen Kugel über, und sollte die Vergrößerung um 109 333 *km*², die dabei die Zone vom Äquator bis 35° geographischer Breite (Tabelle VI) erfahren würde, durch die mit der Abkühlung der Erde verbundene Kontraktion aufgehoben werden, so müßte auf der kontrahierten Kugel die Zone vom Äquator bis zur Breite von 34° 54′ 35·68″ — nämlich der reduzierten Breite von 35° geographischer Breite — denselben Flächeninhalt haben, wie heute auf der Erde die vom Äquator bis 35° geographischer Breite reichende Zone: also den Flächeninhalt von 145 809 654 *km*². Das wäre der Fall, wenn sich der mittlere Erdradius infolge der Abkühlung von 6 370 283 *m* auf 6 367 896 *m*[1]), also um 2 387 *m* verkürzte.

Und in ähnlicher Weise findet sich, daß, um die Vergrößerung der Zone vom Äquator bis 5° geographischer Breite aufzuheben, eine Verkürzung des mittleren Erdradius auf 6 366 756 *m*, also um 3 527 *m* erforderlich wäre. Das ist bis auf 1 *m* derselbe Betrag, der, wie wir früher (S. 25) gesehen haben, nötig wäre, um die Verlängerung des Meridianquadranten beim Übergange der Erde von der doppelten zur heutigen Abplattung durch eine Verkürzung des mittleren Radius wettzumachen. In dem gegenwärtigen Falle ist die Rechnung deshalb nicht auch sozusagen pro praeterito, sondern pro futuro, nämlich für den Übergang der Erde von der heutigen Abplattung zur Kugel durchgeführt worden, weil sie andernfalls hier ungemein kompliziert und schwierig wäre, und das Resultat den bisherigen Untersuchungen zufolge doch nur um ein geringes verschieden sein könnte.

Um dies auch zahlenmäßig darzutun, wollen wir die damals gepflogene Rechnung rasch auch für den Übergang der Erde von der heutigen Abplattung zur Kugel anstellen. Es ergibt sich, daß in diesem Falle, um die mit der Gestaltsänderung verbundene Verlängerung des Meridianquadranten wettzumachen, eine Ver-

[1]) Berechnet nach der Formel $R = \sqrt{\frac{Z}{2\pi \sin \psi}}$.

kürzung des mittleren Radius auf 6 366 742 *m*, also um 3 541 *m* nötig wäre. Die Differenz gegenüber dem Übergange von der doppelten zur heutigen Abplattung ist also nicht groß, denn sie beträgt nur 13 *m*.

Dagegen wäre, um die Verlängerung des Meridianbogens vom Äquator bis 55° geographischer Breite zu paralysieren — welche Verlängerung (Tabelle I) 8 406 *m* beträgt — eine Verkürzung des Radius auf 6 361 512 *m*, also um 8 771 *m* erforderlich. Zu einer Verkürzung des mittleren Erdradius um diesen Betrag wären nach den heutigen Abkühlungsverhältnissen (vgl. S. 25) schon etwa 330 Millionen Jahre nötig; immerhin noch ein geringerer Zeitraum, als — gleichfalls unter den gegenwärtigen Umständen — die Gezeitenreibung brauchen würde, um durch die Abplattungsverringerung die betreffende Verlängerung des Meridianbogens zu erzielen.

Bei der vorhin erwähnten Gelegenheit haben wir (S. 26) — beiläufig — gefunden, daß, wenn die Erde lediglich infolge der Gezeitenreibung und unter Volumswahrung von der doppelten Abplattung zur heutigen übergegangen wäre, die Gezeitenreibung den Effekt gehabt haben müßte, die Länge des Sterntages um $6^h\ 53^m\ 49^s$ zu verlängern[1]). Es ist, wie schon erwähnt, kein Grund zu der Annahme vorhanden, daß die Einwirkung der Gezeitenbremsung auf die Tageslänge jemals durch die entgegengesetzte Einwirkung der mit der Abkühlung der Erde verbundenen Kontraktion kompensiert worden wäre; aber nehmen wir einmal an, es wäre dennoch so gewesen, und versuchen wir zu ermitteln, um wieviel sich alsdann die Erde zusammengezogen haben müßte, wenn bei ihrem Übergange von der doppelten zur heutigen Abplattung die Umdrehungsgeschwindigkeit unverändert geblieben wäre.

---

[1]) Selbstverständlich ist bei einer derartigen „Berechnung" auf die Sekunden, ja auch auf die Minuten kein Gewicht zu legen; es ist aber doch geboten, mit den erhaltenen Zahlen ohne Abrundung weiterzurechnen, damit wenigstens die Rechnung als solche stimme und keine Summierung von Abrundungsdifferenzen erfolgen könne. — Es ist kaum nötig zu bemerken, daß in dieser ganzen Arbeit aus demselben Grunde die Schärfe der Rechnung viel weiter getrieben ist, als es unsere Kenntnis der wirklichen Dimensionen der Erde eigentlich gestattet.

Es müßte alsdann die Kontraktion darauf hingewirkt haben, die Länge des Sterntages um den vorhin bezeichneten Betrag zu verkürzen.

Strenge wohl nicht, da bei der doppelten Abplattung die Dichtigkeitsverteilung im Erdinnern nicht dieselbe war wie heute, aber immerhin mit einiger Annäherung dürfen wir die Winkelgeschwindigkeit — da die Masse konstant ist — dem Quadrate des mittleren Radius umgekehrt proportional ansetzen. Es folgt, daß der mittlere Radius zur Zeit der doppelten Abplattung 7 550 361 *m* gemessen, sich also seither um nicht weniger als 1 180 078 *m* oder fast 16 % verkürzt haben müßte. Dies ist ein so hoher Betrag, daß die Annahme, es hätte in früheren Zeiten eine Kompensation zwischen den Einwirkungen der Gezeitenreibung und der Abkühlungskontraktion auf die Erdumdrehung stattgefunden, als äußerst unwahrscheinlich — um nicht zu sagen vernünftigerweise undenkbar — wird von der Hand gewiesen werden müssen.

Es ist auch nicht ohne Interesse, die mit der Veränderung der Abplattung Hand in Hand gehenden Veränderungen der geographischen und der geozentrischen Breite und ihr Verhältnis zur reduzierten Breite zu verfolgen (Tabelle IX). Von den drei Breiten ist natürlich — und dies gilt ganz allgemein für jeden beliebigen Punkt des Meridianquadranten — die geographische Breite stets die größte, die geozentrische die kleinste; die reduzierte liegt dem Ausmaße nach dazwischen. Mit der Verringerung der Abplattung nimmt die geographische Breite eines jeden bestimmten Punktes ab, die geozentrische aber zu, so zwar, daß sich beide immer mehr und mehr dem Werte der reduzierten Breite nähern, bis sie schließlich, wenn das Sphäroid in die inhaltsgleiche Kugel übergeht, mit dieser zusammenfallen.

Richtet man sein Augenmerk allein auf die geographische Breite, so könnte man, wenn man diese mit der Verringerung der Abplattung abnehmen sieht, leicht zu der falschen Ansicht verleitet werden, daß jeder Punkt der Erdoberfläche bei Abnahme der Abplattung äquatorwärts, also auf dem nördlichen Halbsphäroide nach Süden verschoben werde, während in Wirklichkeit doch gerade das umgekehrte der Fall ist und alle Punkte polwärts wandern. Die Lage eines Punktes wird nämlich auf jedem Sphäroide und ebenso auch auf der Erde unmittelbar und absolut einzig und allein durch die geozentrische Breite gekennzeichnet; nur aus der geozentrischen, nicht aber aus der geographischen Breite kann man, wenn man Punkte verschiedener Sphäroide vergleicht, sofort deren nördlichere oder südlichere Lage ersehen. Die geographische Breite ist lediglich ein praktischer Notbehelf, dessen Existenzberechtigung auf der Leichtigkeit seiner Bestimmung mit Hilfe der auf der Erde von der Natur selbst gegebenen Lotrichtung beruht. Die Lotstörungen aber ziehen nach sich, daß die geographischen Parallelkreise in Wirklichkeit weder Kreise noch Parallelkreise, sondern ganz unregelmäßige Kurven und daher streng genommen nicht geeignet sind, die Lage eines Punktes, nämlich seinen Abstand von dem nicht minder unregelmäßigen geographischen Äquator, allgemein gültig und in einheitlicher Weise zu bezeichnen. Wenn sich die Umdrehung der Erde rascher ändert, als sich die Erdgestalt der Änderung des Verhältnisses von Fliehkraft zu Schwerkraft anzupassen vermag, so muß sich doch sofort die geographische Breite aller Punkte zwischen Äquator und den Polen ändern, obwohl ja alle diese Punkte alsdann in Wirklichkeit ihre Lage noch nicht im geringsten verändert haben.

Das Hauptübel der geographischen Breite liegt darin, daß sozusagen ihre Basis variabel ist, da — von den Lotstörungen abgesehen — der Durchschnittspunkt der Lotrechten mit der großen Halbachse für jede Breite ein anderer ist. Auf einem bestimmten Sphäroide muß allerdings — theoretisch! nämlich von den Lotstörungen abgesehen — der höheren geographischen Breite die höhere Lage, näher zum Pole, entsprechen; auf verschiedenen, inhaltsgleichen Sphäroiden aber mitnichten. Hier ist einzig und allein die geozentrische Breite direkt maßgebend.

Wir haben wiederholt (S. 17, 41) gesehen, daß die allgemeine Annahme, es sei die stets fortschreitende Abkühlung der Erde mit einer stets fortschreitenden Kontraktion des Erdballes verbunden, zu dem Schlusse führen würde, daß die mit der Verringerung der Abplattung verbundene Verlängerung des Meridianquadranten und die Vergrößerung der äquatorialen Zonen durch die in derselben Zeit mit der Abkühlung der Erde erfolgende Kontraktion nicht nur wettgemacht, sondern sogar ins Gegenteil verwandelt werden. Dazu kommt nun aber noch, daß, worauf

C. R. Van Hise[1]) hingewiesen hat, eine Kontraktion der Erde unabhängig von der Abkühlung infolge der Gezeitenbremsung eintritt.

Die Gezeitenbremsung verlangsamt die Rotation der Erde; die Folge ist eine Verminderung der Fliehkraft. In weiterer Folge ändert sich die Gestalt des Sphäroides, die äquatoriale Halbachse wird kleiner, die polare größer, daher die Abplattung geringer. Durch die Verminderung der Fliehkraft wird nun allenthalben vom Äquator bis zu den Polen die Schwere größer, während zufolge der Gestaltsänderung die fliehkraftfreie Schwerkraft — die lediglich auf der Gravitation beruhende Schwerkraft[2]) — in den niederen Breiten größer, in den höheren dagegen kleiner wird. Einer Anregung Van Hises folgend, hat nun Ch. S. Slichter[3]) unter Berücksichtigung dieser Umstände ermittelt, daß und um wieviel mit der durch die Gezeitenbremsung verursachten Verminderung der Abplattung der Druck im Erdinnern wächst. Aus

---

[1]) C. R. Van Hise. Estimates and Causes of Crustal Shortening. Journ. of Geol., VI, Chicago 1898, S. 56.

[2]) Es wäre wohl sehr wünschenswert und hoch an der Zeit, daß die nominelle Auseinanderhaltung dieser Begriffe durch eine internationale Vereinbarung einheitlich geregelt würde. Die meisten deutschen Autoren bezeichnen als „Schwerkraft" oder kurzweg „Schwere" die Kraft, die den Druck eines Körpers auf seine Unterlage bewirkt, also die Resultierende aus der auf der Gravitation beruhenden Anziehungskraft der Erde und aus der Fliehkraft. Andere dagegen nennen diese Resultierende „scheinbare Schwere" und verstehen unter „Schwerkraft" die zuerst genannte Komponente allein. Im Französischen unterscheidet man vielfach — dem Vorgange Clairauts folgend — in dem zuletzt bezeichneten Sinne zwischen „Pesanteur" und „Gravité", im Englischen ebenso zwischen „Gravity" und „Attraction", so daß also das französische „Gravité" dem englischen „Attraction", und das englische „Gravity" dem französischen „Pesanteur" entspricht!

Überhaupt wäre auch ein Übereinkommen über ein bestimmtes „geodätisches Alphabet" nicht von Übel. Es wird z. B. die große Halbachse zumeist mit a, die kleine mit b bezeichnet; Slichter bezeichnet umgekehrt die kleine mit a, die große mit b. Für die Abplattung wird in deutschen Werken zumeist der Buchstabe $\mathfrak{a}$ (Helmert) oder α (Jordan, Günther, Messerschmitt, H. Wagner) verwendet und für die numerische Exzentrizität e (Helmert, Günther, Jordan) oder ε (Haentzschel, H. Wagner). Dagegen findet man bei englischen und amerikanischen Autoren (Harkness, Slichter) ε für die Abplattung u. dgl. m.

[3]) Ch. S. Slichter: Note on the Pressure within the Earth. Journ. of Geol., VI, Chicago 1898, S. 66.

dieser Druckzunahme ergibt sich nach einem von Laplace aufgestellten Gesetz eine Verminderung der mittleren Dichte, und diese wiederum hat eine Verminderung des Volumens und damit natürlich auch eine solche der Oberfläche zur Folge. Slichter hat — allerdings nur näherungsweise — berechnet, daß der Übergang der Erde von der Abplattung $\frac{1}{7{\cdot}5} = 40\alpha$ zur Kugel eben dieses Überganges wegen mit einer Verminderung der Oberfläche um 2 700 000 Square Miles (6 990 000 km^2) verbunden wäre, was einer Verkürzung des mittleren Erdradius um rund 27 Miles (43 km) entspräche; und der Übergang von der Abplattung $\frac{1}{12} = 25\alpha$ zur Kugel mit einer Verminderung der Oberfläche um 1 700 000 Square Miles (4 400 000 km^2), entsprechend einer Radiusverkürzung um 17 Miles (27 km)[1].

Nach Slichters Vorgang und Formeln ist nun die folgende Tabelle berechnet, in der die Oberflächen der Hemisphäroide und die mittleren Radien verzeichnet sind, wie sie sich für die Erde von der 10fachen heutigen Abplattung bis hinab zur Kugel ergeben, wenn man die Kontraktion berücksichtigt, die aus den in Rede stehenden physikalischen Gründen mit der Abplattungsverringerung ursächlich verbunden ist. Die mit der Verringerung der Abplattung aus geometrischen Gründen Hand in Hand gehende Verminderung der Oberfläche, die aus der Tabelle VIII ersichtlich ist, ist dabei nicht mit einbezogen, so daß sich also der Gesamteffekt aus einer entsprechenden Summierung der Daten der Tabellen VIII und X ergeben würde.

Man sieht: Die durch die Abnahme der Fliehkraft verursachte Kontraktion ist der Abplattung proportional. Mit jeder Verringerung der Abplattung um ihren heutigen Wert vermindert sich die Oberfläche des Halbsphäroides um 85 230 km^2 [2]), der mittlere Radius um 1·06 km.

[1]) Slichter hat diese beiden Abplattungen in Betracht gezogen, weil sie die Abplattung limitieren, die die Erde nach G. H. Darwin gehabt haben muß, als sich der Mond von ihr loslöste.

[2]) Nach den vorhin im Texte mitgeteilten Angaben Slichters für das 40mal und das 25mal so stark wie heute abgeplattete Sphäroid wäre diese Verminderung etwas größer, nämlich 86 300 km^2. Das kommt daher, weil Slichter — auch während der Rechnung selbst — stärkere Abrundungen vorgenommen hat. Beim Radius macht sich der bezügliche Unterschied erst in den Metern geltend.

Tabelle X

Abplattung	Oberfläche des Halbsphäroides	Verminderung		Mittlerer Radius	Verkürzung	
		von Stufe zu Stufe Δ_1	beim Übergang zur heutigen Abplattg. = a		von Stufe zu Stufe Δ_1	b. Übergang z. heutigen Abplattg. = a
	Quadratkilometer			Kilometer		
$10\,a = \frac{1}{30}$	255 827 100		767 100	6 380·9		9·6
		85 200			1·0	
$9\,a = \frac{1}{33}$	255 741 900		681 900	6 379·9		8·6
		85 200			1·1	
$8\,a = \frac{1}{37}$	255 656 700		596 700	6 378·8		7·5
		85 300			1·1	
$7\,a = \frac{1}{43}$	255 571 400		511 400	6 377·7		6·4
		85 200			1·0	
$6\,a = \frac{1}{50}$	255 486 200		426 200	6 376·7		5·4
		85 200			1·1	
$5\,a = \frac{1}{60}$	255 401 000		341 000	6 375·6		4·3
		85 300			1·1	
$4\,a = \frac{1}{75}$	255 315 700		255 700	6 374·5		3·2
		85 200			1·0	
$3\,a = \frac{1}{100}$	255 230 500		170 500	6 373·5		2·2
		85 200			1·1	
$2\,a = \frac{1}{150}$	255 145 300		85 300	6 372·4		1·1
		85 300			1·1	
$1\,a = \frac{1}{300}$	255 060 000			6 371·3		
		85 200			1·0	
$0\,a = \frac{1}{\infty}$	254 974 800			6 370·3		

Die Daten der voranstehenden Tabelle können selbstverständlich nicht denselben Grad von Genauigkeit beanspruchen wie die bisherigen Berechnungen, die ja rein mathematische Ableitungen aus den Besselschen Erddimensionen sind. Hier dagegen sind Faktoren in die Rechnung einbezogen, die nur näherungsweise eingeschätzt werden können, wie die Schwerkraft auf und in den verschieden abgeplatteten Sphäroiden, die wiederum von den Dichtigkeitsverhältnissen abhängt, und wie die Größe des Druckes im Mittelpunkt, die nicht einmal für das heutige Erdsphäroid genau bekannt ist, und die für dieses in Übereinstimmung mit

Arrhenius[1]) und anderen zu rund 3 Millionen Atmosphären angenommen wurde. Ferner basiert die ganze Argumentik und Rechnung auf der Voraussetzung, daß die ganze Dichtezunahme nach dem Erdinnern auf Kompression durch Druck beruhe — eine Annahme, die durchaus nicht den Beifall aller Physiker findet[2]). Es handelt sich also hier um eine verhältnismäßig roh durchgeführte Rechnung; die Resultate sollen auch nur dazu dienen, die Größenordnung der betreffenden Veränderungen zu markieren.

Immerhin geht das eine daraus hervor, daß die Oberflächenverminderung, die als Folge der durch die Gezeitenbremsung verursachten Abnahme der Fliehkraft eintritt, weit beträchtlicher ist als jene Oberflächenverminderung, die geometrisch mit der Verringerung der Abplattung verknüpft ist. Dies gilt hauptsächlich für die jüngere Vergangenheit der Erde; denn das gegenseitige Verhältnis der beiden Verminderungen ändert sich mit dem Werte der Abplattung. Das Ausmaß der geometrischen Verminderung (Tabelle VIII) nimmt mit der Abplattung ab, das der physikalischen — um uns so kurz auszudrücken — ist dagegen (Tabelle X) der Abplattung proportional. So kommt es, daß beim Übergange des Sphäroides von der 10fachen zur 9fachen Abplattung von heute die physikalische Verminderung 8mal so groß ist wie die geometrische, dagegen beim Übergange von der doppelten zur heutigen Abplattung nicht weniger als 55mal. Die physikalisch mit der Verringerung der Abplattung verbundene Kontraktion spielt also, je weiter man die Geschichte der Erde aus astronomischer Urzeit zur Jetztzeit verfolgt, eine relativ immer stärker und stärker hervortretende Rolle. Wenn nun obendrein auch noch eine Kontraktion durch Abkühlung hinzukommt, so ist es klar, daß bei dem Zusammenwirken aller Vorgänge die mit der Gestaltsänderung für sich allein verbundenen partiellen Verlängerungen der Meridianbögen niederer und mittlerer Breiten (Tabelle I und II) nicht bestehen können, sondern durch die aus den beiden anderen Ursachen in viel stärkerem Grade erfolgenden Verkürzungen überwältigt werden.

---

[1]) S. A. Arrhenius: Lehrbuch der kosmischen Physik. Leipzig 1903, S. 284.

[2]) H. Benndorf: Über die physikalische Beschaffenheit des Erdinnern. Mitt. Geol. Ges. Wien, I, 1908, S. 330.

Was nun die Kontraktion durch Abkühlung betrifft, so ist es schwer, sie mit der Veränderung der Abplattung und deren Folgen zeitlich in Beziehung zu bringen. Wir haben es (S. 25) unter der Annahme jener Kontraktion als wahrscheinlich erkannt, daß sich der mittlere Erdradius in der Zeit des Überganges der Erde von der doppelten zur heutigen Abplattung infolge der Abkühlung um 3 bis 4 *km* verkürzt habe. Da sich nun in derselben Zeit der Erdradius infolge der Verminderung der Fliehkraft (Tabelle X) nur um 1 *km* verkürzt hat, so würde wenigstens in der jüngeren Vergangenheit die durch die Abkühlung verursachte Kontraktion die durch die Fliehkraftabnahme veranlaßte mehrmals übertroffen haben.

In früheren Zeiten war, wie schon bemerkt, die Abkühlung wohl stärker, viel mehr aber auch die Gezeitenbremsung. Auf einen weiter zurückgreifenden Abschätzungsversuch müssen wir aber vorläufig noch verzichten.

Ebenso wie mit der fraglichen Abkühlungskontraktion ist natürlich auch mit der auf der Verringerung der Fliehkraft beruhenden eine Beschleunigung der Rotation verbunden, die der Gezeitenbremsung direkt entgegen wirkt[1]). Es tritt also hier der merkwürdige Fall ein, daß dieselbe primäre Einwirkung, die die Rotation direkt verzögert, gerade dadurch sekundäre Wirkungen auslöst, die die Rotation wieder beschleunigen — sich also selbst in weiterer Folge schwächt. Allerdings ist, wie wir gleich sehen werden, diese Schwächung so unbedeutend, daß die Bremsung dadurch so gut wie gar nicht alteriert wird.

Bei jeder Verminderung der Abplattung um ihren heutigen Wert verkürzt sich infolge der Verminderung der Fliehkraft (Tabelle X) der mittlere Erdradius um 1·06 *km*. Würde sich nun der mittlere Erdradius heute um diesen Betrag verkürzen, so würde, wie sich leicht berechnen läßt, deswegen der Sterntag nur um 29^s kürzer werden. Je rascher sich die Erde bei größerer Abplattung drehte, desto geringer mußte natürlich der Effekt der Radiusverkürzung um jenen Betrag auf die Änderung der Rotationsdauer gewesen sein. Beim Übergang von der doppelten zur heutigen Abplattung bestand er nur mehr in einer Verkürzung des Sterntages um 21^s, beim Übergange von der

[1]) Diesen Punkt haben Van Hise und Slichter nicht berührt.

10fachen zur 9fachen Abplattung von heute gar nur mehr in einer solchen um 10^6.

In der folgenden Tabelle ist die Länge des Sterntages verzeichnet, wie sie der jeweiligen Abplattung von der 10fachen angefangen bis herab zur heutigen entspricht[1]).

Tabelle XI

Abplattung	Länge des Sterntages	Zunahme $\triangle_1$	Zunahme $\triangle_2$	Jeweilige Summe der Zunahme
$10\,a = \frac{1}{30}$	$8^h\ 01^m$			
		23^m		
$9\,a = \frac{1}{33}$	$8^h\ 24^m$		4^m	23^m
		27^m		
$8\,a = \frac{1}{37}$	$8^h\ 51^m$		7^m	50^m
		34^m		
$7\,a = \frac{1}{43}$	$9^h\ 25^m$		10^m	$1^h\ 24^m$
		44^m		
$6\,a = \frac{1}{50}$	$10^h\ 09^m$		12^m	$2^h\ 08^m$
		56^m		
$5\,a = \frac{1}{60}$	$11^h\ 05^m$		17^m	$3^h\ 04^m$
		$1^h\ 13^m$		
$4\,a = \frac{1}{75}$	$12^h\ 18^m$		33^m	$4^h\ 17^m$
		$1^h\ 46^m$		
$3\,a = \frac{1}{100}$	$14^h\ 04^m$		$1^h\ 12^m$	$6^h\ 03^m$
		$2^h\ 58^m$		
$2\,a = \frac{1}{150}$	$17^h\ 02^m$		$3^h\ 56^m$	$9^h\ 01^m$
		$6^h\ 54^m$		
$1\,a = \frac{1}{300}$	$23^h\ 56^m$			$15^h\ 55^m$

Man sieht, daß eine Verkürzung des Sterntages um fast 7^h nötig war, um das Erdsphäroid von der doppelten Abplattung auf die heutige zu bringen. Dagegen spielen natürlich die wenigen Sekunden, um die dabei die Rotation der Erde

[1]) Die Fliehkraft am Äquator des 10mal so stark wie heute abgeplatteten Sphäroides wurde (vgl. S. 32, Anmerkung) 9mal so groß angenommen wie heute. Danach wurde die Fliehkraft für die anderen Abplattungen interpoliert. Dann ergibt sich die Länge des Sterntages für die betreffende Abplattung aus $t_1 = 2\pi\sqrt{\frac{a_1}{f_1}}$.

durch die mit der Abnahme der Fliehkraft verbundene Kontraktion wieder beschleunigt wurde, gar keine Rolle.

Diese Tabelle ist übrigens auch noch in mehr als einer andern Hinsicht lehrreich.

Sie zeigt, daß die Zunahme des Sterntages, also die Verlangsamung der Erdrotation, die nötig ist, damit sich die Abplattung des Erdsphäroides jeweils um den heutigen Abplattungswert vermindere, mit der Abnahme der Abplattung in einer immer stärker und stärker ansteigenden Reihe wächst; insbesondere aus den ersten und zweiten Differenzen ist dies mit Leichtigkeit zu erkennen. Während eine Verlängerung des Sterntages um 23^m ausreichte, um die Abplattung von dem 10fachen auf den 9fachen heutigen Wert zu reduzieren, war eine Verlängerung um fast 7^h erforderlich, um den Übergang von der doppelten zur heutigen Abplattung zu bewirken. Daß dem so sein muß, ist von vornherein leicht zu erschließen, wenn man bedenkt, daß, wenn die heutige Abplattung der Erde nochmals um ihren Betrag abnehmen, die Erde also zur Kugel übergehen sollte, die Länge des Sterntages ∞ werden müßte.

Daraus geht des weiteren hervor, daß bei gleicher Stärke der Gezeitenbremsung die Abplattungsverminderung in früheren Zeiten ganz unvergleichlich rascher erfolgte als in der zuletzt verstrichenen Periode. Der Übergang von der 10fachen zur doppelten Abplattung war die Folge einer Verlängerung des Sterntages um 9^h, der von der doppelten zur heutigen einer solchen um 7^h. Gleiche Gezeitenbremsung vorausgesetzt, hätte also der Übergang der Erde von der Abplattung $\frac{1}{30}$ zur Abplattung $\frac{1}{150}$ nicht einmal 1·3mal so viel Zeit in Anspruch genommen, wie der von der zuletzt bezeichneten Abplattung zur heutigen. Je weiter wir rückwärts blicken, desto rascher muß mithin die Erde ihre Abplattung verringert haben.

Wenn man auf S. 26 gelesen hat, daß, nach dem **heutigen** Ausmaße der Gezeitenbremsung zu schließen, fast 2000 Millionen Jahre — nach einem andern Ansatze allerdings kaum 400 Millionen Jahre — seit der Zeit verstrichen sein mußten, wo die Abplattung der Erde doppelt so groß war wie heute, so mochte man wohl vor dem Gedanken an jene Zeit zurückschrecken, wo die Abplattung 10mal oder gar noch mehrmals stärker war als heute.

Jetzt dagegen sehen wir: Je weiter wir in die Vergangenheit zurückblicken, desto rascher ändert sich das Bild. Und wenn wir obendrein mit der größeren Stärke der Gezeitenbremsung früherer Zeiten rechnen, so werden wir nicht anders als zugeben müssen, daß sich der ganze Übergang der Erde von der 10fachen oder selbst einer noch höheren Abplattung zur heutigen innerhalb eines Zeitraumes vollzogen haben könne, dessen Größenordnung etwa 1000 Millionen Jahren entsprechen mag.

Jedenfalls war das Tempo der Gestaltsänderung der Erde früher rascher als jetzt, und die Zeit, die für diese Gestaltsänderungen füglich in Anspruch genommen werden muß, wird für die Vertreter der historischen Geologie gewiß keinen Stein des Anstoßes bilden. Es ist ja bekannt, daß überhaupt das Alter, das die Physiker für die Erde berechnen, soweit auch die Angaben untereinander differieren, doch weit unter dem zurückbleibt, das die Geologen in Anspruch nehmen zu müssen glauben.

III. Folgerungen

Die Gezeitenreibung bewirkt eine stetige Verlangsamung der Erdumdrehung, die wiederum eine Verminderung der Fliehkraft und dadurch einerseits eine Verringerung der Abplattung und anderseits eine Kontraktion der Erde nach sich zieht. Mit der Verringerung der Abplattung ist eine fast gleichmäßige Verkürzung aller Parallelkreise verbunden, während deren Abstände voneinander, also die entsprechenden Meridianbögen, vom Äquator bis ungefähr 55° Breite in stets abnehmendem Maße verlängert, von dort aber bis zum Pole in wachsendem Maße verkürzt werden. Die Zonenflächen werden in demselben Tempo, aber nur bis 35° Breite, vergrößert, dann bis zum Pole verkleinert. Das Ausmaß dieser Veränderungen haben wir in dem vorigen Abschnitte kennen lernen.

Wir haben auch gesehen, daß die Kontraktion, die infolge der Abnahme der Fliehkraft eintritt, die Erdoberfläche in weit höherem Maße verkleinert, als dies im ganzen durch die Gestaltsänderung als solche geschieht, und daß die Kontraktion, die unabhängig von der Gezeitenbremsung nach allgemeiner Annahme durch die Abkühlung der Erde bewirkt wird, noch viel beträchtlicher wäre als jene. Es könnte demnach scheinen, als ob die Veränderungen der Erdoberfläche, die als unmittelbare Folge der Abplattungsverringerung auftreten, gegenüber denjenigen, die auf den beiderlei Kontraktionen beruhen, einen völlig zu vernachlässigenden Faktor bildeten.

Dies trifft jedoch, wenn wir unser Augenmerk auf die Frage der Gebirgsbildung richten, keineswegs zu.

Gebirgsbildung kann nur erfolgen, wenn das Gleichgewicht der Erdkruste, die den gewaltigen Dimensionen des Erdkörpers gegenüber lediglich als ein Oberflächenhäutchen erscheint, lokal durch Druck gestört wird, sei es nun, daß dieser Druck in horizontaler oder vertikaler Richtung wirke, also von der Seite oder von unten her. Nur ungleichmäßige Verschiebung der Erdoberfläche in irgend welcher Richtung kann Gebirgsbildung veranlassen.

In dieser Hinsicht wäre nun die auf der Fliehkraftabnahme beruhende Kontraktion sofort gänzlich auszuschließen, wenn sie nach allen Radien gleichmäßig erfolgte; denn durch die gleichmäßige Kontraktion eines Körpers wird mit seinem Rauminhalte auch seine Oberfläche wohl verkleinert, aber nicht lokal im Gleichgewicht gestört. Daß aber die in Rede stehende Kontraktion radial gleichmäßig erfolgte, ist aus folgender Erwägung ausgeschlossen.

Die Fliehkraft ist dem Quadrate der Winkelgeschwindigkeit proportional; nimmt also die Winkelgeschwindigkeit ab, so wird wohl die Fliehkraft allenthalben auf der Erdoberfläche gleichmäßig geschwächt, nicht aber auch gleichmäßig ihre jeorts der Schwerkraft entgegenwirkende Komponente, die auf der Kugel vom Kosinus der Breite abhängt, während auf der sphäroidischen Erde das Verhältnis komplizierter ist. Die durch die Verminderung der betreffenden Fliehkraftkomponente sozusagen freiwerdende Schwere wird also vom Äquator polwärts abnehmen. Dazu kommt, daß mit der Verringerung der Abplattung die Radien vom Äquator bis ungefähr 35° Breite in abnehmendem Maße verkürzt, von dort bis zum Pole in zunehmendem Maße verlängert werden. Dadurch wird der Unterschied noch größer. In den höheren Breiten dürfte die Verminderung der Schwere, die auf der Zunahme der Entfernung vom Mittelpunkte beruht, sogar größer sein als die Vermehrung, die der Abnahme der Fliehkraft entspricht. Jedenfalls muß die Kontraktion, die aus der Abnahme der Fliehkraft folgt, am Äquator am stärksten sein und gegen die Pole — vielleicht bis zum Umschlag ins Gegenteil — abnehmen. Darüber wären genauere Untersuchungen erst noch zu pflegen. Alles in allem dürfte sich ergeben, daß diese ungleichmäßige Kontraktion das Bestreben hat, die Abplattung der Erde noch weiter zu vermindern. Dadurch würden dann die Verschiebungen der Erdoberfläche, die wir in dem vorigen Abschnitte berechnet haben, noch gesteigert.

Die der Abkühlung zugeschriebene Kontraktion betrifft sicher auch nicht gleichmäßig den ganzen Erdball. In den frühesten Zeiten kann dies schon deshalb nicht der Fall gewesen sein, weil die sphäroidische Oberfläche der Erde, also die Abkühlungsfläche, bei gleicher Winkelgröße in den polaren Regionen merklich größer war als in den äquatorialen; bei der heutigen, schon so sehr kugelähnlichen Gestalt der Erde hat diese Differenz jene Rolle wohl ausgespielt. Dafür ist jetzt mit den verschiedenen klimatischen Zonen zu rechnen und vor allem mit dem Unterschiede zwischen Festland und Meer. Da die Bodentemperatur des Weltmeeres allenthalben um 0° herum beträgt und jahraus, jahrein konstant bleibt, so findet am Meeresboden ununterbrochen Wärmeabgabe aus dem Erdinnern statt; am Festlande dagegen natürlich nur dann, wann die Außentemperatur tiefer ist als die Temperatur der Bodenschichte mit konstanter Temperatur, also nur im Winterhalbjahre. Die Abkühlung und also auch die ihr zugeschriebene Kontraktion kann deshalb nicht überall auf der Erde gleichmäßig erfolgen, sondern sie muß unter Meeresbedeckung und in den polaren Gegenden stärker sein als in den Gebieten der tropischen Festlandsmassen. Auch diese Frage harrt noch näherer Untersuchung, soll uns aber hier nicht weiter beschäftigen.

Die Abkühlung schreitet von außen nach innen vor; ebenso also auch die damit verbundene Kontraktion. Diese Kontraktion hat deshalb in den ältesten Zeiten, als die Erdkruste noch heiß war, nur diese selbst betroffen und muß Sprünge und Risse darin erzeugt haben, deren mächtigsten vielleicht später für die Umrisse der Festländer bestimmend gewesen sein mochten. Seitdem die Temperatur der Rinde nahezu konstant geworden ist, erfolgen Abkühlung und Kontraktion in immer größerer Tiefe, und die Kontraktionshypothese der Gebirgsbildung nimmt an, daß sich dabei die starre Kruste darüber runzle, ähnlich wie die Schale eines durch Austrocknung schrumpfenden Apfels. Lange Zeit war diese Hypothese tonangebend, ja alleinherrschend; seit wenigen Dezennien wird sie immer mehr und mehr als unzulänglich erkannt und verlassen, zumindest soweit es sich um die Gebirgsbildung in jüngeren Perioden der Erdgeschichte handelt.

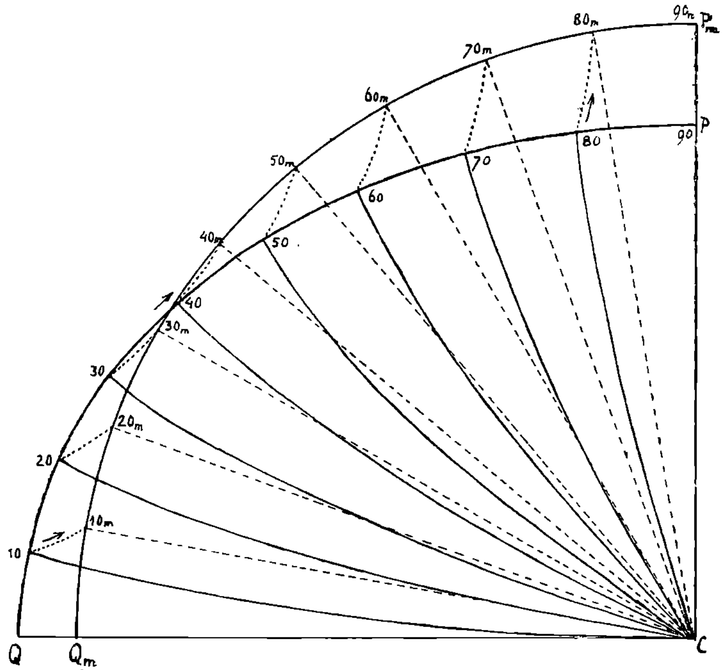

Fig. 3

Geht das Erdsphäroid von irgend einer Abplattung nach und nach in Sphäroide von geringerer Abplattung und schließlich in die inhaltsgleiche Kugel über, so gelangen (Fig. 3) die Punkte 0, 10, 20 usw. des Meridianquadranten QP schließlich nach 0_m, 10_m, 20_m usw. des Meridianquadranten $Q_m P_m$ der Kugel. Die Wege, die die einzelnen Punkte dabei nehmen, sind, wie Rechnung und Konstruktion übereinstimmend ergeben, im allgemeinen keine geraden Linien, sondern äußerst schwach gekrümmte Kurven, die ihre konvexe Seite nach innen kehren; nur die Punkte des Äquators und die Pole legen gerade Wege zurück, da sie durchaus in radialer Richtung verlegt werden.

In der Figur sind auch die Lotlinien gezeichnet, die von jedem betrachteten Punkte zum Zentrum verlaufen. Auf dem Erdsphäroide sind diese Lotlinien Kurven, auf der Erdkugel wären sie Gerade. Die Lotlinien des Sphäroides sind nicht mit den Lotrichtungen zu verwechseln, die auf dem Sphäroide den an die Lotlinien gelegten Tangenten entsprechen und sich nur für Pol und Äquator im Mittelpunkte, sonst aber irgendwo anders schneiden. Könnten wir aber, von irgend einem Punkte der sphäroidischen Erdoberfläche ausgehend und stets dem Zuge der Schwere folgend, tiefer und immer tiefer in das Erdinnere eindringen, so würden wir schließlich, von wo immer wir auch ausgegangen sein mögen, natürlich in den Mittelpunkt gelangen.

Wie die Kurven der Lotlinien des näheren verlaufen, hängt von der Verteilung der Dichte im Erdinnern oder, anders ausgedrückt, von der Abplattung der inneren Erdschichten ab. Unter allen Umständen sind die Kurven gegen die Äquatorebene konvex, gegen die Erdachse konkav. Auch ist es klar, daß das Maß ihrer Krümmung — für Äquator und Pole $= 0$ — vom Äquator polwärts erst langsam und dann immer rascher zunimmt, bis in jene Gegend, wo der Unterschied zwischen geographischer und geozentrischer Breite am größten ist, was nach E. Haentzschel[1]) mit dem Werte von 11′30·66″ in einer schmalen Zone mit dem Mittelparallel von 45° 5′45·33″ geographischer oder 44° 54′14·67″ geozentrischer Breite der Fall ist; worauf die Krümmung polwärts in umgekehrter Weise wieder abnimmt. Ob aber ein und dieselbe Kurve ihrem ganzen Verlaufe nach gleichmäßig oder aber ungleichmäßig, und wo sie alsdann am stärksten gekrümmt ist, dies ist, wie gesagt, eine Frage nach den Abplattungsverhältnissen im Erdinnern: ein Thema, das auch noch nähere Untersuchung lohnte.

Wenn man, wie es so natürlich scheint und deshalb auch zumeist geschieht, die Erdgestalt mit der Kugel vergleicht beziehungsweise sie von dieser ableitet, dann könnte es wohl naheliegend erscheinen, daß die Abplattung der Niveauflächen einwärts abnehme, bis diese schließlich in größerer oder geringerer Entfernung vom Mittelpunkt in Kugelflächen übergingen. Genetisch aber ist die Erdgestalt nicht auf die Kugel zu beziehen, sondern auf viel stärker abgeplattete Sphäroide; die Kugelgestalt spielt in der Vergangenheit der Erde keine Rolle, sie winkt vielmehr aus ferner Zukunft und bedeutet den Tod.

---

[1]) A. a. O., S. 16; vgl. auch S. 91.

Da die Erde niemals eine Kugel, sondern immer abgeplattet war, so müssen auch die Niveauflächen der abyssischen Tiefen seit jeher abgeplattet sein. Die Oberfläche der Erde hat heute genau die Gestalt, die der Geschwindigkeit ihrer Rotation entspricht. Für den Fall, daß dies auch für die Niveauflächen im Innern gilt, haben J. C. E. Schmidt[1]) (1829) und F. R. Helmert[2]) (1884) übereinstimmend gefunden, daß alsdann die Abplattung der Niveauflächen mit der Annäherung an den Mittelpunkt abnehmen und diesem zunächst $\frac{1}{367}$[1]) bis $\frac{1}{372}$[2]) betragen müsse. Wesentlich geringer kann die Abplattung im Erdinnern nicht sein, dagegen ist es möglich, daß sie größer wäre, ja sogar größer als die der Oberfläche. Dies dann, wenn im Erdinnern mit der Verlangsamung der Rotation die Verringerung der Abplattung nicht gleichzeitig mit der der Oberfläche, sondern verspätet erfolgte, was schon mit Rücksicht auf die durch den hohen Druck gesteigerte innere Reibung der den Erdkern ausmachenden Massen nicht unwahrscheinlich ist.

Sei dem nun wie immer: Die Lotlinien sind gegen die Äquatorebene konvex und werden (Fig. 3) bei der Verringerung der Abplattung unter einer polwärts um den Erdmittelpunkt als Endpunkt erfolgenden Drehung immer mehr und mehr zur Geraden ausgerichtet. In der Figur sind, wie alle Verhältnisse, auch die Krümmungen der Lotlinien stark übertrieben. Auf dem physischen Sphäroide bleibt im Gegensatze zu dem geometrischen beim Übergange in ein anderes, inhaltsgleiches Sphäroid oder in die inhaltsgleiche Kugel zwar auch das Rotationsvolumen eines jeden Meridianausschnittes unverändert, nicht aber auch die diesem Rotationsvolumen entsprechende Masse. Die einzelnen je sich selbst massengleich bleibenden Rotationsvolumina entsprechen nämlich auf dem physischen Sphäroide nicht den Rotationsvolumina von Meridianausschnitten im geometrischen Sinne, sondern denen von solchen Meridianausschnitten, die seitlich von den betreffenden Lotlinien anstatt der Radien begrenzt werden. Man könnte deshalb die Lotlinien geradezu als physische Radien bezeichnen. Unsere im ersten Abschnitt entwickelten Gesetze und die darauf im zweiten Abschnitte basierten Berechnungen sind also wohl

---

[1]) A. a. O., I, S. 357.
[2]) A. a. O., II, S. 487.

geometrisch, nicht aber auch in aller Strenge physikalisch richtig; doch sind bei der geringen Abplattung der Erde die Differenzen voraussichtlich so gering, daß die Resultate keine merkliche Änderung erfahren dürften. Übrigens sind wir dermalen auch noch gar nicht in der Lage, das Problem in diesem physikalischen Sinne zu lösen — könnten wir's, so würden wir über die Zustände im Innern der Erde bereits viel mehr wissen, als es heute leider erst der Fall ist.

Die folgenden Betrachtungen sollen der Einfachheit wegen an Hand der Fig. 3 an den Übergang der Erde in die inhaltsgleiche Kugel angeknüpft werden; denkt man sich die Kugel durch die Erde und diese durch ein stärker abgeplattetes Sphäroid ersetzt, wie es der Vergangenheit entspricht, so wird dadurch qualitativ nichts und quantitativ (siehe Abschnitt II) nur sehr wenig geändert. Die Betrachtung gilt also allgemein für jede Verringerung der Abplattung. Wir fassen übrigens das Problem zunächst nur qualitativ ins Auge.

Verringert sich infolge der Gezeitenbremsung die Abplattung der Erde, so daß der Meridianquadrant QP in den Meridianquadranten Q_mP_m übergeht, so gelangt der Durchschnittspunkt D des alten und des neuen Quadranten auf dem letzteren nach D_m, so zwar, daß RotVol. $DQC =$ RotVol. D_mQ_mC[1]). Das Rotationsvolumen DQQ_m, das an seiner Stelle entfällt, wird also geometrisch ersetzt durch das gleich große Rotationsvolumen DD_mC, denn die Masse, die früher den Raum des Rotationsvolumens DQC erfüllt hat, beansprucht jetzt den Raum des Rotationsvolumens D_mQ_mC. Das Rotationsvolumen DPC geht daher in das gleichgroße Rotationsvolumen D_mP_mC über.

Der Teil der Erdoberfläche und der Erdkruste, der sich zwischen D und dem Äquator befindet, wird infolge der Verringerung der Abplattung dem Erdmittelpunkte genähert; der andere Teil auf der betrachteten Sphäroidhälfte, zwischen D und dem Pole, wird dagegen vom Mittelpunkt entfernt. Die Massen mittlerer und höherer Breiten müssen ausweichen und sich in radialer Richtung strecken, um die Annäherung der Massen niederer Breiten an das Zentrum zu gestatten.

---

[1]) Man erinnert sich dessen und der Konstruktion aus dem I. Abschnitte. Vgl. hierzu Fig. 1; in Fig. 3 sind die Punkte D und D_m nicht bezeichnet.

Es ist klar, daß die Massenteilchen höherer Breiten gar keinen Grund zu einer selbsttätigen zentrifugalen Bewegung haben; im Gegenteile: mit dem Nachlassen der Fliehkraft vermindert sich auch deren der Schwerkraft entgegenwirkende Komponente, so daß aus diesem Grunde allenthalben auf der Erde die Schwere wächst. Für sich allein betrachtet, müßten also auch die Massen höherer Breiten, dem stärker werdenden Zuge der Schwere folgend, näher an das Zentrum rücken. Wenn sich also diese Massen dennoch, entgegen dem eigenen Triebe, will heißen dem Zuge der Schwerkraft, vom Mittelpunkte weg bewegen, so müssen sie dazu von anderer Seite gezwungen werden und ihre Bewegung erfolgt passiv.

Umgekehrt verhält sich die Sache in den äquatorialen Regionen. Hier folgen die Massenteilchen mit dem Nachlassen der Fliehkraft direkt dem dadurch gesteigerten Zuge der Schwerkraft und rücken näher an das Zentrum. Die Bewegung, die diese Massenteilchen vollführen, ist daher nichts anderes als eine allgemeine Senkung größten Maßstabes, und diese äquatoriale Senkung, die als unmittelbare Folge des Nachlassens der Fliehkraft und des dadurch bewirkten Wachsens der Schwere, also infolge direkter Kraftwirkung eintritt, ist die primäre Bewegung, die ihrerseits alle weiteren erzwingt. Denn damit die äquatorialen Oberflächenteile unter die Fläche des gegenwärtigen Sphäroides hinabsinken können, müssen sich die polaren dem Raumausmaße nach um ebensoviel über die gegenwärtige Sphäroidfläche erheben, und diese Hebung, die wie gesagt nicht aktiv, sondern passiv ist, wird durch den Druck der äquatorialen Senkung erzwungen. Die äquatoriale Senkung ist also der primäre und aktive Vorgang, die polare Hebung der sekundäre und passive.

Es handelt sich aber nicht nur um eine Senkung der tropischen und um eine Hebung der polaren Gebiete, sondern beide Bewegungen haben außer der zentripetalen beziehungsweise zentrifugalen — also vertikalen oder streng genommen radialen — auch eine horizontale oder tangentiale Komponente. Die äquatoriale Senkung kann nicht erfolgen, ohne daß die Teilchen dabei auch polwärts verschoben werden, denn um sinken zu können, brauchen diese Teilchen Platz. Den verschaffen sie sich, indem sie die polwärts angrenzenden Teilchen polwärts verdrängen[1]). Die Hebung der polaren Massen aber beruht auf einer Ausquetschung, die unter dem Drucke der sinkenden äquatorialen Massen vor sich geht. Dabei werden natürlich auch diese Teilchen polwärts verschoben. So kommen die in der Figur punktiert eingezeichneten Wege zustande, die die betrachteten Massenteilchen der Oberfläche bei der Verringerung der Abplattung beschreiben.

Diese Wege, die nach dem vorigen auch als Drucklinien bezeichnet werden können, sind, wie schon bemerkt, allenthalben äußerst schwach gekrümmte Kurven. Ihre Neigung gegen die Oberfläche aber ist verschieden. Am Äquator und an den Polen fällt die Richtung des durch die Rotationsverlangsamung ausgelösten Druckes mit dem betreffenden Radius zusammen, doch wirkt der Druck am Äquator von oben nach unten, an den Polen von unten nach oben. An allen anderen Punkten sind die Drucklinien mehr oder weniger gegen die Oberfläche geneigt, am stärksten natürlich — denn der Wechsel erfolgt ja allmählich — zunächst dem Äquator und den Polen, am wenigsten in der Umgegend, wo sich die alte und die neue Oberfläche durchschneiden; ja in dieser Gegend selbst sehen wir die Drucklinien, abgesehen von ihrer sanften Krümmung, fast horizontal bezüglich beider Oberflächen verlaufen.

Daß dem gar nicht anders sein kann, ist leicht begreiflich. Die alte Oberfläche geht in die neue über und ihre Punkte werden dabei polwärts verschoben. In der Gegend, wo sich beide Oberflächen durchschneiden und in deren Nähe sie selbst noch nicht weit voneinander entfernt sind, muß also auch die Bahn der Verschiebung stets in der Nähe beider Oberflächen verlaufen, die ganze Verschiebung mithin so gut wie durchaus in tangentialer Richtung erfolgen.

Trotzdem wird das Maximum an tangentialer Verschiebung nicht hier erreicht. Nach der Winkelgröße gemessen muß das Maximum der polwärts erfolgenden Verschiebung dort Platz greifen, wo der Unterschied zwischen reduzierter und geozentrischer Breite am größten ist. Dies ist, wie die Rechnung ergibt, mit $5' 45{\cdot}32''$ in einer Zone der Fall, die sich von $45° 2'$ bis $45° 17'$ geographischer Breite erstreckt. Obwohl nun in dieser Gegend

[1]) Natürlich erfolgt auch ein gegen den Äquator gerichteter Druck, aber diesem wirkt ein gleich großer Druck, der von der andern Hemisphäre ausgeht, entgegen.

die Verschiebung nicht mehr in rein tangentialer Richtung erfolgt, sondern schon eine Hebungskomponente enthält, wodurch ihr tangentiales Ausmaß geschmälert wird, so wächst doch, wie die weitere Rechnung lehrt, bis zum Beginn jener Zone, nämlich bis 45° 2′ geographischer Breite, die ganze Verschiebung rascher als ihre tangentiale Komponente geschwächt wird, so daß das Maximum der tangentialen Verschiebung — also auch das Maximum des tangentialen Druckes — bei rund 45° geographischer Breite eintritt. Noch weiter polwärts bleibt sich zwar die Winkelgröße der Verschiebung innerhalb der erwähnten Zone von 15 Meridianminuten Breite gleich, aber da die Hebungskomponente mit der Annäherung an den Pol stetig zunimmt, so nimmt schon innerhalb dieser Zone die tangentiale Komponente wieder ab.

Diese Abnahme ist allerdings sehr gering und steigert sich auch über jene Zone hinaus vorerst nur langsam. Bei 55° geographischer Breite ist die tangentiale Verschiebung fast noch eben so groß wie bei 35°, nämlich 10 *km*; das Maximum bei 45° beträgt 10·7 *km*[1]).

Die Zone von 35 bis 55° geographischer Breite tritt uns demnach bei der Abplattungsverringerung der Erde als die Zone stärkster tangentialer Pressung entgegen und das Maximum innerhalb dieser Zone selbst wird bei 45° Breite angetroffen.

Dies alles gilt zunächst für den Übergang der Erde in die inhaltsgleiche Kugel, ist also Zukunftsmusik. Indessen verhält sich die Sache für die Vergangenheit nicht wesentlich anders. Wir haben in dem II. Abschnitte wiederholt gesehen, daß die Veränderungen, die aus jeder Verringerung der Erdabplattung um ihren heutigen Wert resultieren, nicht gar sonderlich je nach der Größe der Abplattung differieren und nur wenig anders sind, als wenn sie der Abplattungsverringerung proportional wären. Das kommt daher, weil sich die Erdgestalt, soweit sie hier in

---

[1]) Das Ausmaß der tangentialen Verschiebung ist nicht unmittelbar aus den Längen der Meridianbögen (Tabelle I und II) zu ersehen. Es entspricht näherungsweise dem Bogen des jeweiligen Unterschiedes zwischen reduzierter und geozentrischer Breite, wenn man für die Punkte vom Äquator bis zum Durchschnitt der Sphäroidfläche mit der inhaltsgleichen Kugel den Radius der letzteren, dann aber bis zum Pole den jeweiligen Radius des Erdenpunktes als zuständigen Halbmesser jenes Bogens ansetzt.

Betracht gezogen wurde — also auch bei den größeren Abplattungen — doch nur so wenig von der Kugelgestalt unterscheidet.

Auch die Lage der Schnittparallele der betreffenden Sphäroidoberflächen ist nur wenig voneinander verschieden. Sie ergibt sich, wenn man in den Mittelpunktsgleichungen der Meridianellipsen der betrachteten Sphäroide die beiderseitigen x und y einander gleich setzt. Dann erhält man für die Koordinaten des Durchschnittspunktes, wenn a und a_1 die großen und b und b_1 die kleinen Halbachsen sind, und a und b dem stärker abgeplatteten Sphäroide angehören,

$$x = a a_1 \sqrt{\frac{b_1^2 - b^2}{a^2 b_1^2 - a_1^2 b^2}} \qquad y = b b_1 \sqrt{\frac{a^2 - a_1^2}{a^2 b_1^2 - a_1^2 b^2}}$$

woraus sich alsdann die geozentrische Breite β des Durchschnittspunktes (Durchschnittsparallels) ergibt zu

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{x} = \frac{b b_1}{a a_1} \sqrt{\frac{a^2 - a_1^2}{b_1^2 - b^2}}$$

Für den Durchschnitt eines Sphäroides mit der inhaltsgleichen Kugel vom Halbmesser R_m geht diese Formel über in

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{a^2 - R_m^2}{R_m^2 - b^2}}$$

Will man Sinus oder Kosinus haben, so kann man in dem vorigen Falle nach

$$\sin \beta = \frac{1}{\varepsilon'} \sqrt{\frac{a^2}{R_m^2} - 1} \qquad \cos \beta = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{1 - \frac{b^2}{R_m^2}}$$

rechnen, wobei $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ die numerische und $\varepsilon' = \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}$ die sogenannte zweite Exzentrizität der Meridianellipse bedeutet.

Die Auswertung dieser Formeln ergibt für den Durchschnitt des heutigen Erdsphäroides mit der inhaltsgleichen Kugel die geozentrische Breite $\beta = 35° \, 13'' \, 9{\cdot}03''$, die geographische Breite $\varphi = 35° \, 24' \, 0{\cdot}54''$ und die reduzierte Breite $\psi = 35° \, 18' \, 34{\cdot}60''$.

Das doppelt so stark wie heute abgeplattete Sphäroid schneidet sich mit der inhaltsgleichen Kugel in der geozentrischen Breite von $35° \, 10' \, 25{\cdot}51''$, mit der heutigen Erdoberfläche aber in der geozentrischen Breite von $35° \, 7' \, 43{\cdot}65''$, der die heutige geographische Breite von $35° \, 18' \, 34{\cdot}44''$ entspricht.

Das 10mal so stark wie heute abgeplattete Sphäroid schneidet sich mit der inhaltsgleichen Kugel in der geozentrischen Breite von 34° 48′ 20·44″, mit dem 9mal so stark wie heute abgeplatteten Sphäroide aber in der geozentrischen Breite von 34° 23′ 51·55″. Dieser entspricht auf dem erstgenannten Sphäroide die geographische Breite von 36° 14′ 6·13″ und die reduzierte Breite von 35° 18′ 40·19″[1]), das heißt, jener Schnittpunkt (Schnittparallel) würde auf der inhaltsgleichen Kugel in die letztbezeichnete Breite zu liegen kommen.

Je stärker abgeplattet die Sphäroide sind, desto näher dem Äquator durchschneiden sie sich mit der inhaltsgleichen Kugel. In erhöhtem Maße gilt dies von den Durchschnitten der Sphäroide untereinander[2]). Dies ist auch aus Fig. 2 zu ersehen.

Die Unterschiede sind aber lange nicht so groß, wie man nach Fig. 2 meinen könnte, wo freilich die Abplattungen der dargestellten Sphäroide von $^1/_9$ bis $^1/_2$ betragen, also weitaus größer sind als bei den hier in Betracht gezogenen; jene Unterschiede sind im Gegenteile, wie wir gesehen haben, außerordentlich gering. Die Durchschnitte aller Sphäroide von der 10fachen heutigen Abplattung bis herab zur heutigen untereinander und mit der inhaltsgleichen Kugel liegen, wie man sagen kann, zwischen rund $34^1/_3$ und $35^1/_4$° geozentrischer Breite.

Um ähnlich geringe Beträge wie der Beginn war zu Zeiten größerer Abplattung der Erde auch das Ende der Zone stärkster tangentialer Pressung verschoben, so daß wir also jetzt ganz allgemein feststellen können:

Seitdem die Abplattung der Erde 10mal so groß war wie heute, ist bei der Verringerung der Abplattung infolge der Gezeitenreibung die Zone von 34 bis 55° Breite — es macht eigentlich wenig aus, hier von geographischer oder geozentrischer Breite zu sprechen — stets der Schauplatz größten tangentialen Druckes gewesen, dessen Maximum sich um 45° Breite herum geltend machte. Und so ist es, wenn die Abplattung weiter abnimmt, auch noch heute.

[1]) Der Unterschied zwischen geographischer und reduzierter Breite wächst mit der Abplattung und beträgt in diesem Falle schon nicht weniger als 55′ 21·94″. Dasselbe gilt in erhöhtem Maße von dem Unterschiede zwischen geographischer und geozentrischer Breite.

[2]) Die geographische Breite würde dazu verleiten, das Gegenteil zu vermuten; sie ist zu solchen Vergleichen ungeeignet, wie man sich von S. 43 her erinnert.

Das Ausmaß der tangentialen Verschiebung aber, die inmitten jener Zone einer Verringerung der Abplattung der Erde von dem 10fachen des heutigen Wertes auf diesen herab entspricht, beträgt in runder Zahl 100 *km.*

Ähnliche Bahnen wie die Massenteilchen der Oberfläche müssen bei der Verringerung der Abplattung auch die Massenteilchen im Innern beschreiben. Äquatoriale Senkung und polare Hebung, verbunden mit Verschiebung gegen den Pol, die um 45° Breite herum ihr Maximum erreicht, sind also Vorgänge, die die ganze Erdmasse bis zum Mittelpunkte betreffen.

Nun gibt es keine Wirkung, die, von einem bestimmten Orte ausgehend, überall gleichzeitig einträte. Jede Wirkung bedarf zu ihrer Fortpflanzung Zeit, und ihr Eintritt an einem bestimmten Orte verspätet sich um so mehr, je größer die Strecke ist, über die sie sich fortpflanzt.

In dieser Hinsicht ergibt sich zunächst ein Unterschied zwischen der äquatorialen Senkung und der polaren Hebung. Die Senkung ist die unmittelbare Folge des Anwachsens der Schwere, das an jedem Orte — auch im Erdinnern — zugleich mit der Verminderung der Fliehkraft eintritt. Die Tendenz zur Senkung ist also zwar an jedem Orte instantan, aber dennoch kann die Senkung nicht auch allenthalben sofort mit dem Eintritte ihrer Veranlassung erfolgen. Die äquatorialen Massen können nicht sinken, solange sie nicht dazu Platz haben; den aber verschaffen sie sich, wie gezeigt, durch Verdrängen der polaren Massen. Bezüglich dieser Verdrängung nun liegt aber die Sache wesentlich anders; denn hier handelt es sich um die Fortpflanzung der Wirkung eines von den äquatorialen Massenteilchen — der Oberfläche wie der Tiefe — ausgehenden Druckes. Diese Fortpflanzung aber bedarf einer gewissen Zeit, und zwar einer um so größeren, je größer nicht nur die Entfernung, sondern auch die Widerstände — wie Schwere, innere Reibung u. dgl. — sind, die dabei überwunden werden müssen. Geht auch die Verringerung der Abplattung noch so langsam vor sich, so werden dennoch auch die dadurch bedingten nicht minder langsamen Veränderungen örtlich nur verzögert eintreten können. Selbst wenn die Erde durchaus flüssig wäre, könnte dem nicht anders sein; um so mehr bei dem hohen Grade von Starrheit, den sie, besonders in der Tiefe, besitzt.

Am leichtesten und raschesten folgt jeder Abplattungsverringerung das Meer; ja man kann sagen, daß die Gestalt des Meeresspiegels mit der Abplattung Hand in Hand gehe. Schwerer folgt die feste Kruste, viel schwerer noch die unter hohem Druck befindlichen Massen der Tiefe und am schwersten und deshalb auch langsamsten zweifelsohne der Erdkern, die innersten Partien der Erde.

Es ist wahrscheinlich, daß die Veränderungen in der Tiefe — ja fast ebenso wahrscheinlich auch schon in der festen Kruste — überhaupt nicht stetig vor sich gehen, obwohl sich die Abplattung sicher stetig, wenn auch vielleicht ungleichmäßig vermindert. Wo Widerstände zu überwinden sind, wie hier, sammelt sich ja allenthalben in der Natur die Tendenz zu einem bestimmten Vorgang an, es erfolgt gewissermaßen eine Aufspeicherung von Kraft, eine Aufstapelung von Energie, bis ihr Maß ausreichend ist, die Widerstände siegreich zu überwinden. Nicht nur in der anorganischen, auch in der organischen Welt begegnet man dieser „Anastrophe", wie sich Johannes Walther[1]) treffend ausdrückt. Es ist dies eine ganz allgemeine Erscheinung.

Nun ergibt sich das weitere förmlich von selbst. Die Abplattung vermindert sich, das Meer reagiert sofort und strömt vom Äquator polwärts. Es sinkt also der Meeresspiegel — und zwar nicht scheinbar, sondern tatsächlich — in den niederen Breiten (bis 35°) und steigt an in den mittleren und hohen. Über kurz oder lang folgt aber auch die Kruste der Abplattung nach, und dann tritt das Gegenteil ein.

Während aber, wie gesagt, die Schwankung des Meeresspiegels ganz außerordentlich langsam vor sich geht, da sie mit der Abplattungsverminderung[2]) Schritt hält, ist dies bei der Kruste nicht in demselben Grade der Fall. Diese holt erst später nach, was sie bis dahin versäumt, senkt sich am Äquator und hebt sich

[1]) J. Walther: Geschichte der Erde und des Lebens. Leipzig 1908, S. 551.

[2]) Dieser Ausdruck ist hier und auch sonst der Kürze wegen gebraucht und dürfte wohl kaum zu einem Mißverständnis Anlaß geben. Strenge genommen sollte es natürlich heißen, daß die Schwankung des Meeresspiegels Schritt halte mit der Resultierenden der auf die Erdgestalt einwirkenden und auf eine Abplattungsverminderung abzielenden Kräfte. Denn die Abplattungsverminderung bezieht sich auf die Gestalt und wird also durch den Gestaltswechsel vollzogen.

rings um die Pole. Diese Senkung und Hebung der Kruste geht dann aber viel rascher vor sich als jene des Meeresspiegels, weil die Kräfte, die sie bewirken, aufgesammelt wurden. Es ist dies mit dem Wettgange zweier Fußgänger zu vergleichen, von denen der eine ein äußerst langsames, aber stetiges Tempo einhält, während der andere des öfteren stille steht, um dann den Zeitverlust durch rascheres Tempo wieder einzubringen. Auf diese Weise müssen allenthalben auf der Erdoberfläche positive und negative Strandverschiebungen, um mit Suess, oder marine und kontinentale, um mit Supan zu sprechen, im Laufe der Zeiten wechseln; doch müßte aus diesem Grunde die wirkliche Senkung des Landes in den Tropen und dessen Hebung in den hohen Breiten unvergleichlich rascher von statten gehen, als das gleichfalls wirkliche Sinken und Steigen des Meeresspiegels in denselben Gebieten.

Die Schwankungen des Meeresspiegels, die bisher einer zureichenden Erklärung ermangelten, erscheinen hierdurch ihres rätselhaften Wesens entkleidet. Der in sehr großen Zeiträumen erfolgende Wechsel negativer und positiver Phasen am Äquator mit gleichzeitigen positiven und negativen Phasen um die Pole, wie er von Suess sowohl auf Grund umfassender Studien über die Verbreitung und Entwicklung der geologischen Formationen als auch nach einer Diskussion der in jüngster Zeit erfolgten Strandverschiebungen als wahrscheinlich erkannt wurde, entspricht vollständig unseren Darlegungen. Nicht minder stimmt es damit überein, wenn Suess[1]) wiederholt das langsame Vordringen der Transgressionen und dagegen die Raschheit der großen negativen Bewegungen betont, welche Angaben aus Beobachtungen und Schlüssen abgeleitet sind, die vorzugsweise die mittleren und höheren nördlichen Breiten betreffen. Die langsame Transgression entspricht in diesen Gebieten der langsam und stetig mit der Abplattungsverringerung erfolgenden Hebung des Meeresspiegels gegen die Pole, die rasch verlaufende negative Bewegung der anastrophisch nachfolgenden Hebung der Kruste.

Wenden wir nun unser Augenmerk den Veränderungen zu, die die Längen der Halbachsen des Erdsphäroides bei der Verminderung der Abplattung erleiden.

---

[1]) E. Suess: Das Antlitz der Erde. II., Wien 1888, S. 686, 687, 689.

Tabelle XII[1])

Abplattung $\mathfrak{a}_1$	Große Halbachse a_1 Meter	Verkürzung $\triangle_1$ Meter	Verkürzung $\triangle_2$	Kleine Halbachse b_1 Meter	Verkürzung $\triangle_1$ Meter	Verkürzung $\triangle_2$
$\frac{1}{25} = 12\,\mathfrak{a}$	6 457 812			6 198 768		
		7 479			14 384	
$\frac{1}{27} = 11\,\mathfrak{a}$	6 450 333		35	6 213 152		18
		7 444			14 366	
$\frac{1}{30} = 10\,\mathfrak{a}$	6 442 889		34	6 227 518		17
		7 410			14 349	
$\frac{1}{33} = 9\,\mathfrak{a}$	6 435 479		33	6 241 867		15
		7 377			14 334	
$\frac{1}{37} = 8\,\mathfrak{a}$	6 428 102		35	6 256 201		18
		7 342			14 316	
$\frac{1}{43} = 7\,\mathfrak{a}$	6 420 760		33	6 270 517		15
		7 309			14 301	
$\frac{1}{50} = 6\,\mathfrak{a}$	6 413 451		33	6 284 818		17
		7 276			14 284	
$\frac{1}{60} = 5\,\mathfrak{a}$	6 406 175		33	6 299 102		15
		7 243			14 269	
$\frac{1}{75} = 4\,\mathfrak{a}$	6 398 932		32	6 313 371		17
		7 211			14 252	
$\frac{1}{100} = 3\,\mathfrak{a}$	6 391 721		33	6 327 623		16
		7 178			14 236	
$\frac{1}{150} = 2\,\mathfrak{a}$	6 384 543		32	6 341 859		16
		7 146			14 220	
$\frac{1}{300} = 1\,\mathfrak{a}$	6 377 397		32	6 356 079		16
		7 114			14 204	
$\frac{1}{\infty} = 0\,\mathfrak{a}$	6 370 283			6 370 283		
		87 529			171 515	

Die Längenänderung der Halbachsen mit der Abplattungsverringerung erfolgt, wie man sieht, in der Weise, daß einer jeden Verminderung der Abplattung um ihren heutigen Wert eine Verkürzung der großen Halbachse um etwas über 7 *km* und eine Verlängerung der kleinen Halbachse um etwas über 14 *km* entspricht. Seitdem die Erde 10mal so stark abgeplattet war wie heute, hat sich infolge dieser Gestaltsänderung die äquatoriale Halbachse um 65 *km* verkürzt und die polare um 129 *km* ver-

[1]) Diese Tabelle ist die Reproduktion der Tabelle III, ergänzt durch die betreffenden Differenzen.

längert. Das sind sehr bedeutende Beträge. Beachtenswert dabei ist, daß die äquatoriale Senkung, die bei jeder Verringerung der Abplattung erfolgt, eine polare Hebung nach sich zieht, deren Ausmaß in radialer Richtung fast das Doppelte der äquatorialen Senkung beträgt. Deshalb müssen auch die Differenzen, um die die Kruste bei ihrer etappenweise bewerkstelligten Anpassung an die sich immer mehr der Kugel nähernde Gestalt, wie sie jeweils durch den sich sofort richtig einstellenden Meeresspiegel repräsentiert wird, in den niederen Breiten über und in den hohen Breiten unter diesem zurückbleibt, und die sie alsdann in rascherem Tempo wieder ausgleicht, in den polaren Gebieten größer sein als in den äquatorialen. Damit steht wiederum die auffallend hohe Lage der alten Strandterrassen in den höheren Breiten beider Hemisphären und deren Höhenabnahme gegen die niederen Breiten in bestem Einklange.

Dadurch, daß die äquatoriale Senkung und polare Hebung der Kruste zuerst immer hinter der gleichen Bewegung des Meeresspiegels zurückbleibt und sie dann später wieder einholt, entsteht — auf den jeweiligen Meeresspiegel bezogen — eine Art Schaukelspiel zwischen Meer und Land, das die Gegend des 35. Parallels gleichsam zur Unterlage, zur Stütze hat. Hier geht nämlich bei der Gestaltsänderung die äquatoriale Verkürzung der Radien in die polare Verlängerung, die äquatoriale Senkung in die polare Hebung über und hier ist deshalb die Bewegung fast ausschließlich tangential. In dieser Gegend befindet sich auch das „zentrale Mittelmeer“ Neumayrs, von dem die großen Transgressionen ausgegangen sind.

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei hier ausdrücklich betont, daß die Zahlenangaben der vorstehenden wie auch der übrigen Tabellen in dieser Schrift insofern nur eine relative Bedeutung haben, als sie sich ja immer auf eine bestimmte Abplattung beziehen. In welchem Tempo sich die Abplattung verringert hat und in welchen Etappen die Kruste dem gefügigeren Meere jeweils nachgefolgt ist, das wissen wir nicht. Aber man ersieht, daß eine selbst nur unbedeutende Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit und eine unbedeutende Verzögerung der Kruste bei ihrer Anpassung an die geforderte Form ausreichen, um weitausgreifende marine Transgressionen in den mittleren und hohen und scheinbare Hebungen in den niederen Breiten zu bewirken.

Jene Schaukelbewegung von Meer und Land wird natürlich weder immer noch überall in gleichmäßiger Weise vor sich gegangen sein, denn ihr Tempo wird, soweit es sich um die Bewegung der Kruste handelt, nicht nur von der Beschaffenheit dieser selbst, sondern auch von der der zuständigen Partien des Erdinnern beeinflußt. Daraus mußten mannigfache Oszillationen niederer Ordnung erwachsen, wie sie ja auch tatsächlich zu allen geologischen Zeiten stattgefunden haben.

Die Fülle von Komplikationen, die sich aus dem Umstand ergibt, daß die Starrheit der Kruste, also auch das Maß ihrer Nachgiebigkeit, lokal und regional verschieden ist, ist schier unübersehbar. Unter den Ozeanen ist die Kruste der weiter vorgeschrittenen Abkühlung wegen sicher steifer als sonst. Wenn aber Meeresgrund und Festland verschieden und zu verschiedenen Zeiten auf die Abplattungsverminderung reagieren, so wird dadurch auch das Ausmaß der Meeresräume verändert und daraus können Strandverschiebungen folgen, die dann nur scheinbar in das entwickelte System nicht passen.

Die Kruste kann in den äquatorialen Gegenden nicht sinken, bevor nicht auch in der Tiefe eine Senkung Platz greift. Ohne Zweifel ist aber die Kruste früher bereit, ihre Gestalt der aufgelaufenen Vermehrung der Schwere anzupassen, als die stark komprimierten und starren Massen im Innern. Wenn sich, wie neuerdings vielfach angenommen wird, zwischen dem starren Erdkerne und der Kruste eine plastische Schichte von geringer Mächtigkeit befindet, so wird diese in den niederen Breiten unter dem vermehrten Drucke der sinkenwollenden Kruste an schwächeren Stellen ausgequetscht werden und die Senkung des Meeresspiegels in den tropischen und subtropischen Zonen wird von Intrusionen und vulkanischen Eruptionen begleitet sein. Da sich aber in der plastischen Schichte der Druck, den die Kruste in den niederen Breiten auf sie ausübt, polwärts fortpflanzt, so wird in den höheren Breiten umgekehrt die plastische Schichte gegen die Kruste drücken, so daß auch dort — im allgemeinen freilich infolge der Fernwirkung geschwächt — vulkanische Erscheinungen auftreten können.

Da nun aber die Kruste als Ganzes vorläufig doch noch nicht sinken kann — denn durch die Eruptionen werden höchstens lokale Senkungen ermöglicht —, so wird sie sich einstweilen wenigstens oberflächlich den geänderten Verhältnissen der Schwere anzupassen suchen, das heißt ihre äquatorialen Partien werden sich polwärts strecken und verschieben. Dabei werden Faltungen und Überschiebungen entstehen, insbesondere in den Zonen zwischen 34 und 55° nördlicher und südlicher Breite, wo der tangentiale Druck am stärksten ist. Womit natürlich nicht gesagt ist, daß anderswo Gebirgsbildung ausgeschlossen wäre; denn tangentialer Druck ist ja allenthalben vorhanden.

Am leichtesten beweglich sind innerhalb der Kruste selbst jedenfalls deren obersten Partien; denn je tiefer, desto größer wird der Druck der überlagernden Massen und deshalb auch der Widerstand der Reibung. Indem sich nun die oberen Krustenschichten früher als die darunter befindlichen der durch die Verlangsamung der Rotation gebotenen Änderung der Erdgestalt anpassen, werden sie über ihre vorläufig noch in Ruhe verharrende Unterlage polwärts hinweggeschoben, welcher Vorgang je nach den besonderen Verhältnissen vorher, gleichzeitig oder nachher mit Faltung verbunden sein kann oder auch nicht. Da nun aber der Umfang der Zonen polwärts immer geringer wird, so wird es bei diesem Gleiten der Kruste lokal oder regional auch zu Überschiebungen und Faltungen quer zur meridionalen Richtung kommen, wobei sich unter dem Einflusse beider Druckrichtungen die Leitlinie der Faltung auch krümmen kann, wie es ja tatsächlich in so vielen großen Faltengebirgen der Fall war. Ein Beispiel für Überschiebungen in meridionaler, gefolgt von Überschiebung in dazu senkrechter Richtung scheinen nach den neuesten Forschungen die Alpen zu liefern. Keine andere Gebirgsbildungstheorie bietet für solche tektonische Erscheinungen eine Erklärung.

Da, wie wir (S. 51) gesehen haben, bei gleicher Stärke der Gezeitenbremsung die Verringerung der Abplattung in früheren Zeiten um vieles rascher erfolgen mußte als in den uns näher liegenden, und da es anderseits keinem Zweifel unterliegt, daß die Gezeitenbremsung in jenen früheren Zeiten weit stärker war als heute, so ist es klar, daß die sämtlichen morphologischen Vorgänge, die mit der Verminderung der Abplattung genetisch verknüpft sind, desto intensiver gewesen sein mußten, je weiter wir in die Vergangenheit zurückblicken.

Fassen wir die Verminderung der Abplattung um einen bestimmten Betrag ins Auge und vergleichen wir die beiden Sphäroide, die die entsprechenden Abplattungen besitzen, so hat das stärker abgeplattete Sphäroid einen äquatorialen Wulst und je eine Depression um die beiden Pole. Wulst und Depressionen müssen bei der betrachteten Verringerung der Abplattung verschwinden. Der Wulst sinkt sozusagen ein und erzwingt dadurch die Ausfüllung der ihm an Größe gleichkommenden Depressionen. Dieser relative Wulst hat nun aber, wenn sich die Abplattung um gleiche Beträge verringert, keineswegs einunddieselbe Größe; man ersieht dies aus der folgenden Tabelle, in der die Volumina zusammengestellt sind, die ihm bei verschiedenen Abplattungen entsprechen.

Tabelle XIII

Abplattung		Volumen des äquatorialen Wulstes[1] des Sphäroides A, bezogen auf das Sphäroid B	
Sphäroid A	Sphäroid B	Millionen Kubikkilometer	$\triangle_1$
$10\,a = \frac{1}{30}$	$9\,a = \frac{1}{33}$	1 439	
			5
$9\,a = \frac{1}{33}$	$8\,a = \frac{1}{37}$	1 434	
			5
$8\,a = \frac{1}{37}$	$7\,a = \frac{1}{43}$	1 429	
			5
$7\,a = \frac{1}{43}$	$6\,a = \frac{1}{50}$	1 424	
			5
$6\,a = \frac{1}{50}$	$5\,a = \frac{1}{60}$	1 419	
			5
$5\,a = \frac{1}{60}$	$4\,a = \frac{1}{75}$	1 414	
			4
$4\,a = \frac{1}{75}$	$3\,a = \frac{1}{100}$	1 410	
			5
$3\,a = \frac{1}{100}$	$2\,a = \frac{1}{150}$	1 405	
			5
$2\,a = \frac{1}{150}$	$1\,a = \frac{1}{300}$	1 400	
			5
$1\,a = \frac{1}{300}$	$0\,a = \frac{1}{\infty}$	1 395	

[1]) Das Volumen des Wulstes ergibt sich aus der Differenz der Rotationsvolumina jener Meridianausschnitte der beiden Sphäroide, die durch die geozentrische Breite der Durchschnittspunkte der Meridianellipsen bestimmt sind.

Die Differenzen scheinen für sich betrachtet allerdings nicht groß, doch summieren sie sich in demselben Maße, als früher die Abplattungsverringerung rascher vor sich ging. Selbst wenn die Gezeitenreibung immer von gleicher Stärke gewesen wäre, hätte der Übergang von der 10fachen zur 3fachen Abplattung weniger Zeit in Anspruch genommen, als der von der 2fachen Abplattung zur heutigen[1]). Bei dem Übergange von der 10fachen zur 3fachen Abplattung war ein äquatorialer Wulst von 10 000 Millionen Kubikkilometer auszugleichen, bei dem Übergange von der doppelten zur heutigen nur ein solcher von 1 400 Millionen, wobei — gleiche Gezeitenreibung vorausgesetzt — die beiden Zeitabschnitte, wie gesagt, einander fast gleich waren. Trägt man nun erst noch der ehedem viel größeren Stärke der Gezeitenreibung Rechnung, so muß man erkennen, daß die durch die Gezeitenreibung ausgelösten gebirgsbildenden Kräfte in den früheren Perioden ganz unvergleichlich intensiver waren als in der Jetztzeit der Erde.

Freilich war durch das Sinken des äquatorialen Wulstes in früheren Zeiten auch eine größere Arbeit zu leisten, da in demselben Maße wie der Wulst auch die polaren Depressionen, die durch Hebung ausgefüllt werden mußten, größer waren als jetzt. Bevor es aber zu dieser Hebung kam, war auch der tangentiale Druck des zur Senkung bereiten Wulstes größer und damit also auch die zunächst und direkt gebirgsbildende Kraft.

Kritische Gegenden sind jedenfalls die Stellen, um die die Erdoberfläche bei der Gestaltsänderung gewissermaßen balanciert, wo sich nämlich alte und neue Oberfläche schneiden, wo deshalb die Radien ihre Länge nicht oder doch nur äußerst wenig ändern und wo, wie wir gesehen haben, die Senkung einer fast rein tangentialen Verschiebung weicht. Die ganze Masse, die durch die äquatoriale Senkung polwärts verlagert wird, muß diese Gegend, sei es an der Oberfläche, sei es in radialer Tiefe, passieren; hier muß der Widerstand gebrochen werden, den die polaren Massen dem Drängen der äquatorialen entgegensetzen, und hier sammelt sich deshalb auch die Kraft, die nötig ist, um dies zu vollbringen. Diese Gegend liegt seit erdaltersgrauen Zeiten in der

[1]) Vgl. Tabelle XI. In dem ersten Falle handelt es sich um eine Verlängerung der Rotationsdauer um 6, in dem zweiten um eine solche von fast 7h.

Nähe des 35. Parallels. Von diesem polwärts nimmt aber der tangentiale Druck bis 45° noch zu. Zwischen 35 und 45° Breite muß es also vor allem zum Biegen oder Brechen kommen und damit steht es in Übereinstimmung, daß, wie schon oft und neuerdings erst wieder von F. X. Schaffer[1]) betont worden ist, die Gebiete fast aller katastrophalen Erdbeben, von denen wir Kenntnis haben, zweien Gürteln entsprechen, die sich mit der Mittelbreite von 40° nördlich und südlich vom Äquator hinziehen. Schaffer hat (a. a. O., S. 107) auch schon vermutet, daß die Lage dieser Gürtel mit Veränderungen im Zusammenhange stehe, die der Erdball durch die Rotation und Abkühlung erleidet. Nur ist das Aufwerfen der Frage verfehlt, ob gerade der 40. Breitengrad die Zone rascher Änderung der Erdkrümmung vom äquatorialen Wulste zur polaren Abplattung bezeichne. Die zeitliche Änderung der Krümmung mit der Abplattung ist nämlich gerade an dieser Stelle am geringsten, die streckenweise Änderung der Krümmung der heutigen Erdoberfläche aber am Äquator am stärksten.

Der primäre Gebirgsschub müßte hiernach auf der ganzen Erde in der Richtung vom Äquator nach den Polen erfolgt sein und erfolgen. Dies stimmt im allgemeinen mit den Verhältnissen in Europa, Nordafrika und Nordamerika überein, doch scheinen die asiatischen Faltengebirge umgekehrt für einen Druck von Norden her zu sprechen. In Wirklichkeit können wir aber in allen diesen Fällen niemals die Richtung der absoluten, sondern nur die der relativen Verschiebung bestimmen. Auch ist es keineswegs ausgeschlossen, daß besonderer Verhältnisse wegen manchenorts eine entgegengesetzte Verschiebung erfolgt ist, wie ja auch die Bewegung des fließenden Wassers stellenweise rückläufig wird.

Hat sich die Erdkruste, da sie vorläufig noch nicht sinken konnte, unter dem dadurch gesteigerten tangentialen Drucke stellenweise in Falten geworfen, so wurde dadurch eine Auftürmung von Massen bewirkt, die solcherart in größere Höhe gelangten, als den Niveauverhältnissen des Erdsphäroides entsprach. Diese Massen mußten deshalb vermehrt auf ihre Unterlage drücken und wenn dann endlich die Senkung und Verschiebung in der

---

[1]) F. X. Schaffer: Der Erdbebengürtel der Erde. N. Jahrb. f. Min. usw. Stuttgart 1909, I, S. 102—107.

Tiefe Platz griff und dadurch das Nachsinken der Kruste ermöglichte, so waren jene überlasteten Gebiete vor allen andern zur Senkung reif. Daher kommt es, daß wir Gebirgsbildung und Senkung — mit vulkanischen Eruptionen verbunden — räumlich wie zeitlich so häufig nahe beieinander sehen. Dabei kann es auch sehr wohl zu einer isostatischen Ausgleichung gekommen sein, wie es die sogenannten „Massendefekte" unter den Gebirgen andeuten.

Außer dem tangentialen Drucke, der infolge der Abplattungsverringerung der Erde in meridionaler Richtung nach den Polen wirkt, gibt es aus derselben Ursache noch einen dazu senkrechten Druck, der aus der Verkürzung der Parallelkreise bei ihrem Gleiten gegen die Pole erwächst. Als Resultat des Zusammenwirkens beider können Gebirge jeglicher Richtung des Faltenwurfes entstehen. Welche Druckkomponente dabei den Ausschlag gibt, hängt von den besonderen Verhältnissen ab und müßte für jeden einzelnen Fall erst untersucht werden.

Daß die Änderungen der Erdgestalt, die dadurch bewirkt werden, daß die Gezeitenreibung die Rotation der Erde verlangsamt und so die Erde mittelbar zu einer Verringerung ihrer Abplattung zwingt, ausreiche, um das rhythmische Widerspiel mariner Transgressionen und Regressionen zu erklären, das in der Geschichte der Erde immer und immer wiederkehrt, kann angesichts der vorliegenden Berechnungen wohl kaum einem Zweifel unterzogen werden. Dagegen könnte man, wenn man den Effekt dieser Gestaltsänderungen auf die Größe der Oberfläche ins Auge faßt, immerhin meinen, daß die gebirgsbildende Wirkung der Abplattungsverringerung nicht hinreichend wäre, um auch dem Ausmaße der Faltung zu genügen.

Die Verminderung der Erdoberfläche, die mit der Verringerung der Abplattung von ihrem 10fachen auf den heutigen Wert verbunden ist, beträgt (Tabelle VIII) nicht mehr als 104 500 km^2 oder $0{\cdot}2\,^0/_{00}$ und ergibt sich aus einer Vergrößerung der äquatorialen und einer überwiegenden Verkleinerung der polaren Zonen. Nun schätzt M. P. Rudzki[1]) das Ausmaß der postkambrischen Faltungen auf mindestens 8 100 000 km^2 oder

[1]) M. P. Rudzki: Sur l'Âge de la Terre. Bull. Acad. Sci. Krakau 1901, S. 72—94.

1·16 % der Erdoberfläche. Abgesehen jedoch davon, daß Van Hise[1]) in überzeugender Weise dargetan hat, daß alle solchen Schätzungen kaum mehr als Vermutungen bedeuten, weil dabei zu viele Umstände, die wir nicht kennen, unberücksichtigt bleiben müssen, so wird wohl niemand behaupten wollen, daß die Gesteinsschichten, die heute bald in ungestörter Lagerung, bald in Falten geworfen die Oberfläche der Erde bilden, jemals einundderselben Niveaufläche angehört hätten. Deshalb wäre es gänzlich verfehlt, aus einer Ausebnung der heutigen Erdoberfläche auf ihre vormalige Größe zu schließen. Bei der Frage nach der Gebirgsbildung handelt es sich nicht um Ausglättung, sondern um Faltung. Die Kraft muß nachgewiesen werden, die die Faltung bewirkt — die ursprüngliche Lagerstätte des Materials gehört auf ein ganz anderes Blatt. Man streife die Wogen des Weltmeeres glatt und bemesse danach den Umfang des Erdballes!

Die gebirgsbildende Kraft aber ist bei der Verringerung der Abplattung der Erde durch den Druck gegeben, den die sinkenden und sich dabei polwärts verschiebenden Massen der niederen Breiten auf die Massen der mittleren und hohen Breiten ausüben, wozu sich des weiteren noch der Druck gesellt, der aus der Verengerung der polwärts verschobenen Zonenstreifen erwächst. In dieser Hinsicht dürften die berechneten Größen[2]) wohl für ausreichend befunden werden.

Die Faltung der Kruste erfolgt nicht, weil diese gezwungen würde, ihre Oberfläche zu verkleinern — die Oberfläche der Zonen wird ja bis 35° Breite bei der Verringerung der Abplattung sogar vergrößert —, sondern sie erfolgt, weil mit der Abnahme der Fliehkraft die Schwere der Kruste am stärksten in der äquatorialen Zone wächst, das starre Erdinnere aber, obwohl derselben Einwirkung unterworfen, doch erst viel später darauf reagiert. Infolgedessen deformiert sich jene Krustenzone unter dem angewachsenen Drucke ihrer eigenen Schwere polwärts und schiebt und faltet die angrenzenden, widerstrebenden Partien vor sich her. Wenn dann das Erdinnere aus seiner Lethargie erwacht und die Bewegung mitmacht, treten neuerdings äquatoriale Senkungen und nun erst recht polare Hebungen ein; die einmal erstandenen Ge-

---

[1]) C. R. Van Hise: Estimates and Causes of Crustal Shortening. Journ. of Geol., VI, Chicago 1898, S. 40.

[2]) Siehe die verschiedenen Tabellen und besonders S. 64.

birge aber bleiben erhalten und ihr Übergewicht wird vielleicht bei der Hebung kompensiert.

Ein einziger Umstand ist — dermalen wenigstens — noch nicht zu erklären: warum nämlich die Gebirgsbildung auf der nördlichen Halbkugel in den älteren Zeiten hauptsächlich in höheren Breiten erfolgte und den Ort ihrer Tätigkeit allmählich immer weiter nach Süden verlegte. Bezüglich dieser Frage lassen uns aber auch alle anderen Theorien im Stiche [1]).

* * *

Das Problem der Gebirgsbildung ist so vielseitig und verwickelt, daß es vielleicht niemals völlig und eindeutig wird gelöst werden können. Die Abkühlungshypothese (Kontraktionshypothese) mag den allgemeinen Faltenwurf der ältesten uns bekannten Gesteinsschichten erklären — den mesozoischen und tertiären, lokalen Gebirgsbildungen gegenüber versagt sie. Da sich das Tempo der Abkühlung, seitdem die Kruste einmal eine gewisse Dicke erreicht hatte, nicht mehr wesentlich geändert haben kann, so müßte, wenn dabei als Folgeerscheinung überhaupt Gebirgsbildung stattgefunden hätte, diese ununterbrochen bis heute vor sich gegangen sein. Dies ist aber nicht der Fall. Im Mittelalter und in der Neuzeit der Erde sind verhältnismäßig nur wenige und kurze Perioden der Gebirgsbildung eingetreten, hauptsächlich zur Zeit der Kreide und des jüngeren Tertiärs; dazwischen setzte die Gebirgsbildung durch uns fast unermeßlich scheinende Zeiträume gänzlich aus. Der Gedanke an eine „Verzögerung der Periode“,

---

[1]) Daß bei der Verringerung der Abplattung der Erde tangentialer Druck entsteht, der Gebirgsbildung bewirken kann, ist schon öfter angedeutet und hauptsächlich von W. B. Taylor (Crumpling of the Earth's Crust. Am. J. Sci., 3. Ser. XXX, New Haven 1885, S. 249 - 266) betont worden. Taylor ist jedoch auf den Kernpunkt der Sache — die Mechanik des Vorganges, Richtung und Größe des Druckes und der durch ihn bewirkten Deformationen — nicht eingegangen und hat auch nicht einmal den Versuch gemacht, die mathematische Seite der Frage zu berühren. Seine Ausführungen haben deshalb keine oder nur wenig Beachtung gefunden. T. Mellard Reade (The Origin of Mountain Ranges. London 1886, S. 131) zog daraus zudem den unrichtigen Schluß, daß als Folge der Abplattungsverringerung nur meridionale Gebirgszüge entstehen könnten und verwarf, da dies den Tatsachen widerspricht, mit wenigen Worten die ganze Theorie.

an eine konvulsivische Auslösung aufgesammelter Druckdifferenzen, wie er schon öfter ausgesprochen worden ist, kann hier nicht verfangen und vermag die Schwierigkeit nicht zu bannen. So natürlich die Verzögerung der Krustenbewegungen bei der vorgetragenen Abplattungshypothese ist, so unnatürlich erscheint sie hier. In dieser Hinsicht ist zwischen den beiden Hypothesen ein sehr tiefgreifender, bedeutungsvoller Unterschied vorhanden.

Bei der Abplattungshypothese wird die Tendenz zur Bewegung — Senkung der äquatorialen Gebiete, verbunden mit einer Versetzung gegen die Pole sowie mit einer dadurch erzwungenen Hebung der polaren Massen — gleichzeitig in der Kruste und im Erdinnern erregt, aber das Erdinnere vermag dieser Tendenz nicht gleich zu folgen und hält dadurch die Senkung der Kruste auf. Die Kruste ihrerseits gibt auch nicht gleich dem tangentialen Drucke nach, sondern erst, bis dieser so stark angewachsen ist, um über ihren Widerstand zu obsiegen. Das ist nicht nur möglich, sondern kann gar nicht anders sein.

Nicht so bei der Abkühlungshypothese. Hier geht der Anlaß zur Bewegung, zur Faltung der Kruste — und zwar stetig — von dem durch die Abkühlung schrumpfenden Erdinnern aus und die Kruste müßte dieser Schrumpfung ohne Verzögerung folgen, da die Bildung und Existenz eines Hohlraumes unter ihr nicht einmal episodisch möglich ist. Eine Aufspeicherung von Faltungsenergie bis zu einer temporären Auslösung ist also in diesem Falle unmöglich. Deshalb ist es nach der Abkühlungshypothese nicht verständlich, warum nicht alle geologischen Perioden in nahezu gleicher Weise durch Gebirgsbildung ausgezeichnet sind.

Die Abplattungshypothese erklärt nicht nur dies, sondern auch, warum die Gebirgsbildung, in je fernere Vergangenheit wir blicken, desto allgemeiner war. Es war dies deshalb der Fall, weil sich die Abplattung der Erde desto rascher vermindert hat, je größer sie gewesen, also desto rascher, je weiter ihre Zeit zurückliegt (Tabelle XI). Der letzte Faltenwurf der Erde hat in der jüngeren Tertiärzeit stattgefunden und war sehr gewaltig, ebenso oder vielleicht gewaltiger noch als irgend ein anderer zuvor. Die Erdkruste ist einer unempfindlichen Wage zu vergleichen; je langsamer und behutsamer ich die eine Schale überlaste, desto weiter kann ich dabei gehen, desto kräftiger wird aber alsdann auch der Ausschlag.

Wie kommt nun aber die Abkühlungshypothese (Kontraktionshypothese) über jene Schwierigkeit hinweg?

Daß die Abkühlung der Erde beständig, wenn auch gegenwärtig, ja seit der Existenz einer nur einigermaßen mächtigen Kruste, nur mehr äußerst langsam vor sich geht, unterliegt nicht dem geringsten Zweifel. Zieht sich nun dabei das abkühlende Erdinnere zusammen und wird kleiner, so muß die Kruste der radialen Verkürzung folgen und sich, um dies zu können, falten. So lange die Kruste nur wenig mächtig war, ist dies sicher so geschehen; in dem Zusammenwirken der damals so raschen Abplattungsverringerung und der noch mit der Abkühlung verbunden gewesenen Kontraktion haben wir wohl den Grund zu erkennen, warum wir in den ältesten Gesteinsschichten der Erde allenthalben einem so energischen Faltenbau begegnen.

Seit jenen alten Zeiten aber tritt Gebirgsbildung nur mehr vereinzelt auf, wie es von der Abplattungshypothese erklärt, ja gefordert wird, der Abkühlungshypothese jedoch widerspricht. Dem kleiner werdenden Erdkern m u ß die Kruste augenblicklich folgen und doch wissen wir, daß das nicht geschieht. Zur Lösung dieses Widerspruches ist offenbar nur die eine Erklärung zu finden, daß mit der Abkühlung des Erdinnern überhaupt keine Volumsverringerung mehr verbunden ist.

So ketzerhaft dieser Ausspruch auch auf den ersten Blick erscheinen mag, so ist er doch nicht nur mit unerbittlicher Logik aus den besprochenen Umständen zu folgern, sondern läßt sich weiterhin auch physikalisch begründen.

Das Erdinnere steht unter gewaltigem Druck und ist deshalb jedenfalls stark komprimiert. Die Erdkruste aber besitzt dermalen schon so viel Gewölbestabilität, daß sie zögert, dem schwindenden Erdkern augenblicklich zu folgen. Dadurch entsteht eine momentane, wenn auch bei der Langsamkeit des Vorganges minimale Druckentlastung und infolge dieser Druckentlastung und ihr entsprechend dehnen sich die komprimierten Massen aus, so daß durch die Abkühlung im Erdinnern in Wirklichkeit überhaupt keine Kontraktion erfolgt und der Schlußeffekt des jeweiligen Abkühlungsvorganges vielmehr darin besteht, daß sich diejenigen Dichtigkeitsdifferenzen im Erdinnern, die nicht auf der Materialverschiedenheit, sondern auf Kompression beruhen, bis zu einem gewissen Grade allmählich immer mehr und mehr ausgleichen[1]).

Nach dieser Anschauung kann sich also das Volumen der Erde in jüngerer geologischer Zeit durch Abkühlung nicht mehr wesentlich verringert haben, und wird sich auch weiterhin nicht mehr verringern bis zur völligen Erkaltung der Erde.

Nach den modernen Ansichten wird zwar für das Erdinnere nur mehr eine Temperatur von etwa 3000° angenommen[2]), obwohl allerdings selbst ein so bedeutender Physiker wie S. Arrhenius[3]) noch von einer solchen von 100 000° spricht. Selbst nach dem ersten Ansatze müßte sich bis zur völligen Erkaltung der Erde ihr Radius nach der herrschenden Ansicht über die Abkühlungskontraktion noch um mehr als 100 *km* verkürzen. Und nun stelle man sich einmal vor — wenn man's vermag — wie die Oberfläche der Erde aussehen müßte, wenn dem also geschähe! Ein zerborstenes Trümmerwerk wäre das Ende.

Ganz im Gegenteil sehen wir aber, daß Mars, der weit älter ist als die Erde, eine glatte Oberfläche besitzt und daß der Mond, der wenn nicht schon durch und durch so doch jedenfalls weit mehr erkaltet ist als die Erde, zwar Gebirge besitzt, die die der Erde relativ sogar an Höhe übertreffen, aber keineswegs das Bild zeigt, das man erwarten müßte, wenn sich sein Inneres nach der Bildung einer mächtigen Kruste noch um einen wesentlichen Bruchteil des Radius zusammengezogen hätte.

---

[1]) Ein ähnlicher Vorgang muß auch bei der Bildung von Antiklinalen platzgreifen. Werden Schichten der Erdkruste durch tangentialen Druck zu einer Antiklinalen aufgerichtet, so entsteht unter dem Gewölbe eine Druckentlastung und infolgedessen eine entsprechende Ausdehnung der dort befindlichen komprimierten Massen. Dadurch werden die aufgetürmten Gebirgsmassen automatisch kompensiert, und eine ähnliche Kompensation kann auch bei der Bildung der Kontinente im großen erfolgt sein. Auch bei Überschiebungen in nicht rein horizontaler Richtung kann eine Kompensation erfolgen, denn der gesenkte Schollenflügel drückt stärker auf die Unterlage als der gehobene. Dabei ist es selbstverständlich, daß Druck und unterirdische Massenkompensation nicht immer völlig mit der Oberflächengestaltung übereinzustimmen brauchen.

[2]) H. Benndorf: Über die physikalische Beschaffenheit des Erdinnern. Mitt. Geol. Ges., Wien, I, 1908, S. 332.

[3]) S. Arrhenius: Lehrbuch der kosmischen Physik. Leipzig 1903, I, S. 283, 284, 286.

Sowohl nach den Beobachtungen auf der Erde selbst als auch nach Analogie von Mars und Mond müssen wir vielmehr schließen, daß die Gebirgsbildung den Jugendzustand eines Weltkörpers charakterisiert, mit zunehmendem Alter seltener und schwächer wird und schließlich ganz und gar erlahmt. So muß es auch nach der Abplattungshypothese sein, während nach der Abkühlungshypothese die Gebirgsbildung mit zunehmendem Alter des Planeten zwar langsamer, aber dabei doch gewaltiger erfolgen müßte. Bisher sind ja nur die äußeren Partien der Erde erkaltet, die weit ausgiebigere Erkaltung des ganzen Innern steht noch bevor. Die Hauptgebirgsbildung durch Kontraktion des Erdkernes wäre demnach erst noch zu erwarten.

Die vorgetragene Abplattungshypothese der Gebirgsbildung findet aber in Mars und Mond noch eine weitere Stütze.

Die Gezeitenreibung auf der Erde ist zum weitaus überwiegenden Teil ein Werk des Mondes, dessen fluterzeugende Kraft bei uns die der Sonne heute noch um mehr als das Doppelte übertrifft. Früher, als der Mond der Erde näher stand, war dies um ein Vielfaches der Fall. Im Sinne unserer Theorie ist also die gebirgsbildende Kraft der Erde hauptsächlich dem Monde zu danken. Umgekehrt hat auch die Erde auf dem Mond Gezeitenreibung erzeugt und da ihre Masse viel gewaltiger ist als die des Trabanten, hat sie diesen schon längst seiner selbständigen Rotation beraubt. Der größeren Gezeitenreibung, die die Erde auf dem Monde bewirkt hat, entspricht nun die verhältnismäßig größere Mächtigkeit der Mondgebirge[1]).

Mars dagegen hat keinen Mond, der sich an Masse auch nur im entferntesten mit ihm vergleichen könnte. Seine beiden Monde sind viel zu klein, um merklich auf ihn einzuwirken, und sein Abstand von der Sonne ist hinwiederum sehr groß. Eine Gezeitenreibung von ähnlicher Stärke wie auf der Erde hat es deshalb nie auf ihm gegeben. Damit steht es denn im Einklang, daß seine Oberfläche, soviel wir wissen, der Gebirge ermangelt, denn die alten Faltenwürfe seiner Erstarrungskruste mußten längst der Erosion und Denudation zum Opfer gefallen sein. Nach der Abkühlungshypothese dagegen wäre nicht einzusehen, warum Mars,

[1]) Selbstverständlich sind hier nicht die Krater, sondern nur die Kettengebirge gemeint.

dessen Abkühlung schon sehr weit vorgeschritten sein muß, gegenwärtig nicht dennoch über und über mit jüngeren Gebirgen bedeckt ist, zumal bei seiner bereits eingetretenen Wasserarmut in jüngerer Zeit an eine erfolgreich nivellierende Tätigkeit der Atmosphärilien nicht mehr zu denken ist.

Über die Beschaffenheit der Oberflächen von Merkur und Venus wissen wir sehr wenig, um nicht zu sagen nichts. Die Oberfläche Merkurs soll rauh und gebirgig sein; er ist der Sonne so nahe, daß die Sonnenflutwelle auf ihm ungefähr 8mal so stark ist wie die Mondflutwelle bei uns. Die Gezeitenbremsung der Sonne mußte also die Schnelligkeit seiner Rotation und damit auch die Größe seiner Abplattung stark verringern und dann war Gebirgsbildung die unausbleibliche Folge. Nach Schiaparelli soll er, so wie der Mond der Erde, der Sonne stets dieselbe Seite zukehren, das heißt, seine Rotation schon völlig abgebremst sein, was auch von der Venus behauptet, bezüglich beider Himmelskörper aber von anderen bestritten wird. Verwunderlich wäre es nun gerade nicht, wenn dem dennoch so wäre — eher könnte das Gegenteil überraschen.

Die äußeren Planeten lassen uns ihrer weiten Entfernung wegen in dieser Frage ganz und gar im Stich, dürften sich übrigens auch noch nicht einmal im ersten Stadium einer Krustenbildung befinden.

* * *

Die Erde altert. Die Geschmeidigkeit ihrer Jugend ist dahin. Die Steifheit des Alters macht sich allenthalben in ihrer äußeren Erscheinung geltend.

Früher pulsierte ihr Leben viel kräftiger. In dem Vordringen und Zurückweichen der Meere, in dem häufigen Emporquellen magmatischer Massen, in dem Erstehen und Erlöschen von Vulkanen und in der Bildung und Abrasion mächtiger Gebirgsketten erkennen wir das lebhafte Mienenspiel ihres Antlitzes, da dieses noch im Zauber der Jugendfrische prangte.

Versuchen wir das Alter der Erde nach den Veränderungen zu schätzen, die wir gegenwärtig auf ihrer Oberfläche vor sich gehen sehen, so werden wir zu Zahlen geführt von geradezu schwindelnder Höhe. Die Beobachtung von Veränderungen der Lebewelt versagt dabei gänzlich, weil wir solche Veränderungen in der

Jetztzeit überhaupt nicht oder kaum bemerken. Der Geologe und insbesondere der Paläontologe vermag das Alter der Erde gar nicht zu ermessen.

Der Physiker ist galanter; er schätzt die Dame Erde auf 100 bis einige 100 Millionen Jahre.

So unsicher auch manche Grundlagen der physikalischen Schätzungen und Berechnungen sind, so wäre es doch weit mehr verfehlt, aus dem jetzigen Tempo des Erdenlebens die Dauer der Erdgeschichte erschließen zu wollen. Das Tempo war früher allenthalben rascher, der Wechsel — ein Urquell alles Lebens — größer.

Das gilt nicht nur von den morphologischen Veränderungen, die wir in dieser Schrift betrachtet haben, sondern auch von einer ganzen Reihe anderer Erscheinungen. Infolge der rascheren Rotation waren die Meeres- und Luftströmungen stärker, die klimatischen Gegensätze geringer; die großartige, kombinierte Warmwasser- und Luftheizung der Erdoberfläche wurde früher mit weit größerem Aufwande von Energie betrieben. Die Stürme mußten viel heftiger gewesen sein, die Brandung und ihr Zerstörungswerk an den Küsten gewaltiger in jener Sturm- und Drangperiode der Erde.

Aber rasch wird die Zeit der Jugend durchlaufen — dann wird das Tempo langsamer und endlich schleicht auf Krücken das Alter daher.

So sehen wir es im Leben der Erde, das ja die Grundlage und Voraussetzung ist alles Lebens auf der Erde.

Deshalb ist zu schließen, daß sich das Leben auf der Erde nach dem Leben der Erde richte und vordem auch rascher und kräftiger war als jetzt.

Kann nicht das organische Leben in ähnlichem Maße rascher sich vollzogen haben wie der Wechsel von Tag und Nacht, der in gewissem Sinne sein Regulator ist? Sollte nicht die geringere Schwere das Emporsteigen der Säfte und dadurch die Üppigkeit der Vegetation gefördert haben? Und gilt es nicht als ein biologisches Axiom, daß sich das Leben den jeweiligen Verhältnissen anpasse, und sehen wir nicht in der Vergangenheit alle Verhältnisse sich rascher ändern?

Dieselben Kräfte wie einst wirken auch jetzt, aber dieses Wirken wird immer gleichmäßiger, seine zeitliche Differenzierung geringer, dagegen die regionale größer. Dadurch werden bestimmte

Lebensbedingungen scharf umgrenzt und räumlich eingeschränkt. Das umfassende Weltreich, in dem das Leben auf Erden einst gleichmäßig gedieh und sich oft gleichmäßig, immer neue und neue Formen zeugend, änderte, ist zerfallen; Provinzen haben sich ausgebildet und selbständig gemacht — fast könnte man sagen, ein separatistischer biologischer Kleinbetrieb sei an Stelle des ehemaligen weit ausgreifenden Großbetriebes getreten. Ein allgemeiner Austausch von Lebenskraft ist nicht mehr vorhanden und zu der Bildung neuer Lebensformen ist bei der Konstanz der gegenwärtigen Verhältnisse kein Anlaß. Was an Leben besteht, bleibt einstweilen noch vorhanden, aber neue Impulse werden nicht mehr gegeben oder erst in weiter, künftiger Ferne.

Die Sonne ist die große Lebensspenderin — fast alle irdischen Vorgänge sind auf die Licht- und Wärmestrahlen zurückzuführen, die sie uns zusendet. Nur die Gezeitenreibung wird zum weitaus größeren Teile vom Monde bewirkt. Die Gezeitenreibung aber löst die Kräfte aus, die vor allen anderen gestaltend auf der Erdoberfläche wirken, und verlangsamt stetig mit der Rotation in vieler Hinsicht auch das Leben und Weben der Natur hienieden.

Solcherart beeinflußt das Nachtgestirn das Schicksal der Erde und ihrer Bewohner.