

## Neuere Ansichten über die chemischen Verhältnisse beim Aufbau des Erdballs.<sup>1)</sup>

Von Prof. Dr. F. HENRICH.

(Eingeg. am 17. Okt. 1926.)

Nach den Ergebnissen der Astronomie und anderer Wissenschaften nehmen wir an, daß die Erde eine etwas abgeplattete Kugel ist, die sich mit großer Geschwindigkeit um die Sonne bewegt, und um die wiederum der Mond kreist. Schon früh hat sich die Menschheit Vorstellungen über die Entstehung der Erde gemacht und in der Kant-Laplace'schen Theorie eine wissenschaftlich gut begründete, ziemlich allgemein angenommene Hypothese gefunden. Danach war die Erde nach ihrer Ablösung von der Sonne eine glühende Gasmasse, die sich in lebhafter Rotation befand. Durch Abkühlung kontrahierte sie sich mehr und mehr, wurde größtenteils flüssig und zuletzt an der Oberfläche fest. Dann wirkten atmosphärische Einflüsse chemisch und verursachten in ungeheuren Zeiträumen Riesenmengen mannigfaltiger Zersetzungsprodukte auf dieser Oberfläche, die durch geologische Prozesse wie Schrumpfung und andere mannigfaltige Veränderungen erlitten. So entstand nach und nach der heutige Zustand unserer Erde. Allmählich hat man sich auch über den inneren Aufbau unseres Planeten wohl begründete Vorstellungen machen können.

Bekanntlich gelang es im vorigen Jahrhundert, die Dichte des Erdkörpers auf mehreren unabhängigen Wegen zu rund 5,53 zu bestimmen. Da die Hauptgesteine der festen Erdkruste nur Dichten bis zu 2,9 zeigten, so mußte man annehmen, daß sich in größerer Tiefe der Erde schwerere Massen befinden und es fragt sich, in welcher Weise diese verteilt sind.

Durch die chemische Analyse hat man im Laufe der Zeit die heute bekannten chemischen Elemente auf unserer Erde festgestellt. Das schwerste ist das Osmium ( $d = 22,5$ ), das leichteste der Wasserstoff ( $d = 0,00009$ )<sup>2)</sup>. Wie haben sich diese Elemente im Erdkörper verteilt?

Hierüber hat man sich durch physikalisch-chemische Betrachtungen schon immer Rechenschaft zu geben versucht. Zu den früheren Vorstellungen sind in den letzten Jahrzehnten durch die experimentelle Anwendung physikalisch-chemischer Gesetze neue gekommen, die einen großen Fortschritt bedeuten. Wir haben sowohl über den Gesamtaufbau des Erdkörpers und seine Geschichte, als auch über die Mannigfaltigkeit der Mineralbildungen in und auf ihm neue Anschauungen gewonnen.

Bei den vulkanischen Erscheinungen beobachtete man oft heiße Quellen, die dauernd aus dem Erdinnern kommen, ferner Laven, glühend flüssige Massen, die aus der Tiefe hervorquellen und oben fest werden. Dies führte zu der Anschauung, daß sich im Erdinnern glutflüssige Massen befinden. Ihre Bildung konnte man auf Grund von Temperaturmessungen in Bohrlöchern begreifen. Bis zur größten so erreichten Tiefe stellte man

eine ganz gesetzmäßige Zunahme der Temperatur mit der Tiefe fest. Sie betrug für rund 30 m Tiefenzunahme einen Grad Celsius. Einfache Berechnungen ergaben dann, daß in großen Tiefen Temperaturen herrschen, bei denen die Gesteine auch unter dem Druck der auflagernden Massen geschmolzen sein müssen. So kam man zu der Ansicht, daß sich von der Oberfläche der Erde zunächst feste Gesteine bis auf etwa 60 km Tiefe erstrecken und daß dann ein glutflüssiger, unter hohem Druck befindlicher Gesteinsbrei, das *Magma* folgt. Da die Dichte der Lavaprodukte auch nicht hoch genug war, um die Gesamtdichte der Erde zu erklären, nahm man darunter noch einen metallischen, vorzugsweise aus Nickel-eisen bestehenden, aggregatlosen Erdkern an, der den Planeten nach innen ausfülle. Studien über die Zusammensetzung der Meteore<sup>3)</sup> haben diese Annahme gestützt. Dieser Eisennickelkern sollte mit etwa 300 km Tiefe einsetzen, bei einem Druck, der dermaßen über die Temperatur überwiegt, daß das Material als „druckfest“ oder „druckstarr“ angenommen werden kann. Nach übereinstimmenden Berechnungen muß trotz der hohen Temperatur der Erdkern doppelt so starr, so fest sein wie Stahl bei gewöhnlicher Temperatur.

So hatte sich die Ansicht ausgebildet, daß die Erde eine Art von schalenartigem Aufbau zeigt und das folgende Bild, in dem auch noch die Atmosphäre eingezeichnet ist, gibt das wieder:

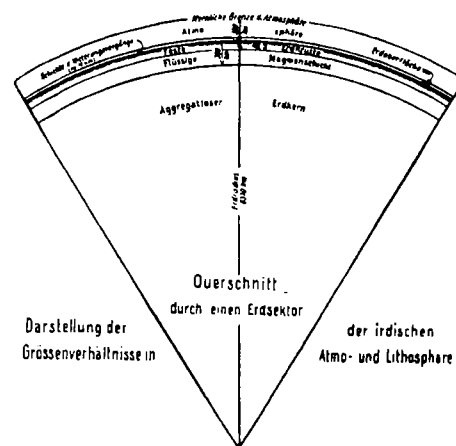


Fig. 1.

Die eben vorgetragene Ansicht von dem inhomogenen, schalenartigen Aufbau der Erde wurde durch die Resultate der Erdbebenforschung teils bestätigt, teils erweitert. Die Seismometer gaben bei den verschiedenen Erdbeben analoge Kurven, die man durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen nach der Elastizitätstheorie erklären konnte. Dabei zeigte es sich, daß sich die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen bis zu bestimmten Tiefen kontinuierlich, dann ziemlich plötzlich diskontinuierlich ändert, wie es der Fall sein mußte, wenn in der Tiefe Medien von anderer Elastizität

<sup>1)</sup> Nach Arbeiten von V. M. Goldschmidt, Viden-skapsselskapets Skrifter, Kristiania, mathemat.-naturwiss. Klasse 1922, Nr. 11; 1923, Nr. 3; 1924, Nr. 4 u. 5; ferner Ztschr. Elektrochem. 1922, 411; von G. Tammann, „Zur Analyse des Erdinnern“, Ztschr. anorgan. allg. Chem. 131, 96 [1923]; 134, 269 [1924]. Siehe ferner G. Linck, „Kreislaufvorgänge in der Erdgeschichte“, Jena 1912; „Der Aufbau des Erdballs“, Jena 1924. Dann S. Roesch, „Naturwissenschaften“ 1924, 868.

<sup>2)</sup> Auf Wasser bezogen.

Angew. Chemie 1927, Nr. 30.

<sup>3)</sup> Die Meteore sieht man als Teile von Weltkörpern an, die durch vulkanische Kräfte oder durch die Wirkung der Sonnennähe zerstört wurden. Außer Metall (Hauptbestandteil) enthalten sie auch Einschlüsse, FeS (Troilit) u. a.

vorhanden sind. Als man auf Grund der neuesten seismologischen Berechnungen die Werte für die Dichten  $\rho$ , den Kompressionsmodul  $\kappa$  und die Festigkeiten  $\mu$  als Ordinaten, die Tiefen als Abszissen in ein Koordinatensystem eintrug, erhielt man folgende Kurven:

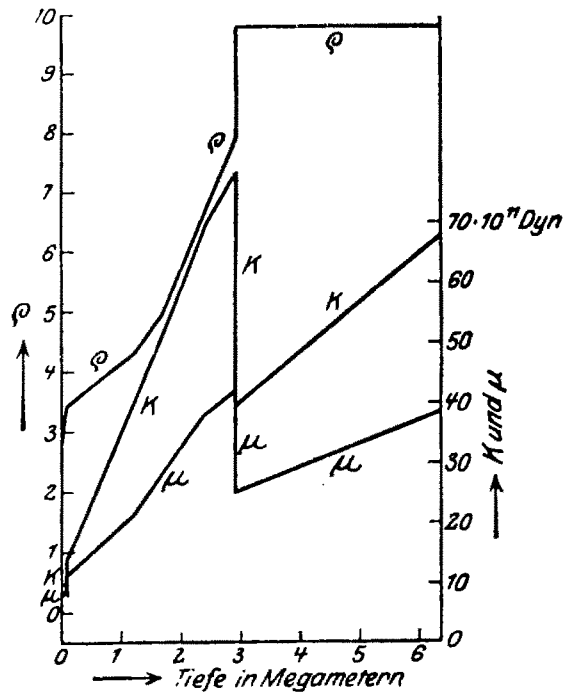


Fig. 2.

Sie zeigen deutlich, daß sich bei 120, 1200 und 2900 km Tiefe die physikalische Beschaffenheit des Erdkörpers so stark ändert, daß man berechtigt ist, in ihnen Grenzflächen von Medien verschiedener Elastizität anzunehmen, zumal innerhalb der so begrenzten Räume die Eigenschaftsänderungen kontinuierlich erscheinen. An diesen Grenzflächen wird bei Erdbeben ein Teil der Wellen reflektiert und aus diesen Reflexionswellen, die in den Seismogrammen auch zu erkennen sind, konnten die Diskontinuitäten in ihrer Lage ebenfalls bestimmt werden.

So hat die Erdbebenforschung das Vorhandensein der bisher angenommenen Schalen nicht nur bestätigt, sondern auch noch eine neue Schicht von der Dichte 5–6 angezeigt. Es erhob sich die Frage, aus welchem Material diese Schicht besteht.

Daß der Erdkern aus unverbundenen Schwermetallen, vorzugsweise Eisen und Nickel besteht, darauf deuten außer der Dichte (etwa 8) und der Zusammensetzung der Eisenmeteorite das magnetische Feld der Erde, das Vorwiegen des Eisens im Sonnenspektrum u. a. hin. Bei den Hauptgesteinen der Erdkruste und den Produkten des Magmas sind Dichten über 4 nicht wahrscheinlich. Manche haben nun angenommen, daß an der Grenze von Magma und Erdkern ein Gemisch von Silicaten und Nickeleisen sich befindet mit Dichten, die den Übergang zwischen beiden bilden könnten. Aber V. M. Goldschmidt meint, daß bei dem großen Schwerefeld der Erde ein solches Gemisch sich nicht halten könne, sondern rasch entmischt würde. Er nimmt vielmehr zum Teil auf Grund von Beobachtungen, auf die wir gleich zu sprechen kommen und aus petrographischen Gründen an, daß sich zwischen Kern und Silicathülle (einschließlich Magma) noch eine Zwischenschicht von der Dichte 5–6 befindet, die chemisch von den anderen verschieden ist. Experimentelle Unter-

suchungen haben nämlich gezeigt, daß Silicatmagmen, die Sulfide enthalten, sich meist schon bei Temperaturen über den Erstarrungsgebieten der gewöhnlichen Sulfide, entmischen und flüssiges Sulfid, insbesondere des Eisens in Form von flüssigen Tropfen ausscheiden, die zu Boden sinken. Aus der metallurgischen Praxis weiß man, daß bei solchen Reaktionsverhältnissen Metalle wie Nickel, Kupfer, Edelmetalle u. a. weitgehend an Schwefel gehen, wodurch sich die relative Armut der Silicatgesteine des Erdmantels an diesen Kulturmetallen erklären ließe. Da es sich mit der Dichte in Einklang bringen läßt und auch petrographische Gründe dafür sprechen, nimmt V. M. Goldschmidt zwischen Erdkern und Silicatschale eine Schicht an, die vorzugsweise aus Sulfiden des Eisens, aber auch zum geringen Teil aus Oxyden dieses Elements, sowie solchen des Chroms, Titans u. a. besteht. In den Meteoriten sind denn tatsächlich auch oft Troilit-Chromitknollen gefunden worden.

Nach diesen Anschauungen besteht die Erdkugel also aus mehreren Schalen, die als Metallkern, Sulfid- und Oxyd- sowie Silicatschale bezeichnet wurden und die ihrerseits wieder gegliedert sein können, wie wir bei der Silicatschale sehen werden.

Man hat sich diese Schalen nun nicht als absolut starre Gebilde, gleichsam im Ruhezustand vorzustellen. Wir beobachten vielmehr z. B. in der oberen noch zahlreiche chemische Reaktionen oder wie es Goldschmidt nennt, einen lebhaften „Stoffwechsel“, über dessen Natur eine große Anzahl von Untersuchungen Aufklärung zu geben suchten und suchen.

V. M. Goldschmidt, Tammann u. a. haben neuerdings physikalisch-chemische Gesetze, besonders die Phasenlehre in solche Untersuchungen einbezogen und wesentliche Fortschritte erzielt. Wir ersehen daraus nicht nur, wie die Schalengliederung der Erde zustande gekommen ist, sondern wie sie noch weiter fortschreitet. Sie vergleichen die Verhältnisse bei der Bildung des Erdkörpers mit metallurgischen Verhältnissen. Danach gleicht die Erde in ihrem Aufbau dem flüssigen Inhalt eines Tiegels, in den Metall eingeschmolzen wurde. Auch hier sondern sich die Bestandteile zunächst zu drei Schichten: Metall, Stein und Schlacke, also zu drei Phasen und Goldschmidt betrachtet nun den ganzen Erdball in einem bestimmten Zustand seiner Entwicklung als ein Dreiphasensystem, wozu als vierte Phase noch die Gashülle kommt, und wendet darauf die Gesetze des chemischen Gleichgewichts an.

Der jeweilige Zustand eines physiko-chemischen Systems ist gegeben 1. durch die Eigenschaften seiner chemischen Bestandteile, 2. durch seine Vorgeschichte, 3. durch die äußeren Kräfte, die auf das System einwirken und, da unser System eine bedeutende Masse besitzt, 4. durch die Gravitationswirkung, die das System selbst auf seine Bestandteile ausübt. Die chemischen Bestandteile sind die irdischen Elemente, die Vorgeschichte besteht in der Annahme, daß die Erde anfangs gasförmig, später flüssig und zuletzt teilweise fest wurde. Wenn ursprünglich eine homogene oder angenähert homogene Mischung der Elemente vorhanden war, so dürfte bei der Ausbildung eines Schwerefeldes durch die Gravitationswirkung bald eine teilweise Sonderung der Bestandteile schon in der Gasphase stattgefunden haben. Mit zunehmender Abkühlung und Ausbildung mehrerer Phasen wurde der Einfluß des Schwerefeldes immer größer und es entstanden die Schalen verschiedener Dichte, die wir oben kennengelernt haben.

Denkt man sich nun den Erdball in einem bestimmten Stadium der Abkühlung als aus drei flüssigen Phasen bestehend, die sich gegenseitig nur sehr unvollkommen mischen, so haben sich die Elemente gesetzmäßig in ihnen verteilt. Man kann darum aus dem durchschnittlichen Metallgehalt der Silicathülle nach den Gesetzen des chemischen Gleichgewichts auf den durchschnittlichen Metallgehalt der Oxyd-Sulfidschicht und auf den des Metallkerns schließen.

Die durchschnittliche Zusammensetzung der Silicathülle ist nun die folgende:

A. Hauptbestandteile	B. Nebenbestandteile
SiO <sub>2</sub> . . . 59,09 %	Mn, F, Cl, S, Ba, Cr, Zr, C, V, Ni, Sr . . 0,1—0,01 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . 15,35 %	Li, Cu, Ce, Co, B, Be . . . 0,01—0,001 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe O . . 6,88 %	Th, U, Zn, Pb, As . . . 0,001—0,0001 %
MgO . . . 3,49 %	Cd, Sn, Hg, Sb, Mo . . . 0,0001—0,00001 %
CaO . . . 5,08 %	Ag, Bi . . . . . 0,00001—0,000001 %
Na <sub>2</sub> O . . . 3,84 %	Au . . . . . 0,000001—0,0000001 %
K <sub>2</sub> O . . . 3,18 %	Ra . . . . . 0,000000001—0,0000000001 %
H <sub>2</sub> O . . . 1,14 %	
TiO <sub>2</sub> . . . 1,05 %	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . . . 0,30 %	

Auffallend hierbei ist, wie relativ selten darin die halbedlen und edlen Metalle sind. Aber auch aus der metallurgischen Praxis weiß man, wie gesagt, daß die Verteilungsquotienten der halbedlen und edlen Metalle in einem derartigen Dreiphasensystem solche sind, daß nur ein minimaler Teil dieser Metalle sich in der Silicatschmelze, die die Schlacke darstellt, befindet. Goldschmidt berechnete nun unter Abschätzung der Druckbeeinflussung auf Grund metallurgischer Daten aus dem durchschnittlichen Metallgehalt der Silicathülle die Metallgehalte der Sulfid-Oxydschale und des Metallkerns. Es ergab sich dabei, daß die Hauptmengen von Nickel, Kupfer, Silber, Gold und Platinmetallen in den erwähnten Schichten liegen müssen. Bei der chemischen Zusammensetzung der Meteoriten fand man zudem, daß sie tatsächlich mehr Platin enthalten als irgendein Silicategestein der Silicathülle und daß ihr Nickelgehalt 6—10 % beträgt. In der Sulfid-Oxydschale müssen besonders Kupfer, Silber und Gold sich angereichert haben.

Dabei mußte berücksichtigt werden, daß der heutige Gehalt der Silicathülle an den besagten Metallen geringer ist als unmittelbar nach der Entmischung, denn man setzte ja bei der Berechnung die Silicathülle als flüssig voraus.

Unter der Annahme, daß unter dem Einfluß fortschreitender Kristallisation eine Trennung in leichtere und schwerere Anteile derart stattgefunden hat, daß schwerere Bestandteile absanken (und wieder einschmolzen), leichtere und Gase aufstiegen, konnte Goldschmidt auf Grund erfahrungsgemäß festgestellter Verteilungsquotienten der Elemente, auf technischen Erfahrungen und geochemischen Beobachtungen, die Verteilung der Elemente in den vier Phasen folgendermaßen anordnen, wobei die in ( ) geschlossenen Elemente in geringer, die in (( )) eingeschlossenen in relativ sehr geringer Menge in der betreffenden Phase vorhanden sind:

1. Metallkern (siderophile Elemente): Fe, Ni, Co; P, C; Mo (Wo); Pt, Ir; Os (?), Ru, Rh. — Eisen ist der Hauptbestandteil, Nickel 6—10%; Kobalt etwa ein Fünftel des Nickelgehalts. Phosphor und Kohlenstoff sind im Metallkern stärker angereichert als in den anderen Phasen, Kohlenstoff um ein Vielfaches mehr als in den beiden anderen Schmelzen, Phosphor (als Phosphide) etwa um

das Doppelte mehr als in der Silicathülle. Molybdän wird auf 0,05—0,1 % geschätzt. Die Platinmetalle dürften ähnlich wie im Meteoreisen in einer Menge von einigen Gramm pro Tonne im Metallkern vorhanden sein.

2. Sulfidschale (chalkophile Elemente): ((O)), S, Se, Te; Fe, (Ni), (Co), Mn?; Cu, Zn, Cd, Pb; (Sn?), Ge, (Mo?); As, Sb, Bi; Ag, Au, Hg; Pd, (Ru?), (Pt); Ga, In, Tl. — Der Hauptbestandteil ist FeS. Der Ni- und Cu-Gehalt dürfte in dieser Phase von gleicher Größenordnung sein und kommt direkt nach dem Eisen, die anderen Bestandteile sind in der Sulfidschmelze relativ angereichert, wenn auch ihre absolute Menge gering ist.

3. Silicathülle (lithophile Elemente): O, (S), (P), (H); Li, Ti, Zr, Hf, Th; F, Cl, Br, J; B, Al, Se, seltene Erden; Li, Na, K, Rb, Cs; Be, Mg, Ca, Sr, Ba; (Fe), V, Cr, Mn, ((Ni)); ((Co)); Nb, Ta, W, U, Sn; (C). Die Stofftrennung in ihr werden wir bald besprechen.

4. Gashülle (atmosphärische Elemente): H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>), (Cl?); He, Ne, A, Kr, Xe.

Zahlreiche Untersuchungen haben sich dann mit dem Stoffwechsel in der Silicathülle beschäftigt und besonders V. M. Goldschmidt hat uns ein Bild gegeben, wie sich hier eine Differenzierung der Stoffe und damit eine Gliederung der Silicathülle vollziehen könnte.

Wir gehen aus von der ursprünglich flüssigen Silicatphase, die wir mit Goldschmidt das Urmagma nennen wollen. Man hat es naturgemäß als eine Schmelzlösung betrachtet, die sich unter den jeweiligen physikalisch-chemischen Bedingungen in Kristalle und Lösung scheidet und hat die Gesetze der Kristallisation von Salzlösungen, besonders aber von Metallegierungen auf diesen Prozeß angewendet. Zuerst studierte man zu diesem Zweck Schmelzfürisse natürlicher Magmen und suchte die Kristallisationsfolge derselben zu den vermuteten Eutektipunkten der Komponenten in Beziehung zu bringen. Bald zeigte sich aber, daß man mit dem Studium der Schmelzen wohldefinierter passender chemischer Verbindungen weiter kam und besonders N. L. Bowen hat im geophysikalischen Laboratorium des Carnegie-Instituts grundlegende Untersuchungen über die Gleichgewichte solcher Schmelzfürisse gemacht. Während die Ausscheidungsdiagramme der meisten damals bekannten Metallsysteme relativ einfach, mit eutektischen Schmelzkurven zwischen den reinen Komponenten oder deren Verbindungen aufgebaut waren, zeigte es sich, daß dieser einfachste Fall der eutektischen Erstarrungskurven bei den reinen, gesteinsbildenden Mineralien keineswegs der häufigste und wichtigste war. Die kieselsäurereichsten Silicate zeigten vielmehr Neigung bei hohen Temperaturen inkongruent in eine kieselsäurereiche Schmelze und einen kieselsäurearmen Bodenkörper zu zerfallen. Orthoklas z. B. spaltet sich bei 1170° in Leucit und eine kieselsäurereichere Schmelze. Ausscheidung und Restmagma können ihrerseits wieder Mischkristalle bilden, falls die Ausscheidung nicht durch eine trennende Kraft, wie z. B. ein Schwerfeld aus dem Magma entfernt wird. Je nach dem, was unter den verschiedenen Möglichkeiten eintritt, ist eine große Mannigfaltigkeit von Kristallisationsprodukten denkbar. Sie dürfte bei der langsamen Kristallisation des Urmagmas unter dem Einfluß der allmählichen Abkühlung stattgefunden haben. Zu den ersten Kristallisationsprodukten gehören besonders Magnetit (FeO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Fe (mit Chromit [C<sub>2</sub>FeO<sub>2</sub>]Fe), ferner Olivin, Orthosilicate des Magnesiums, Eisens u. a. Mit ihrer Ausscheidung werden Eisen und Titan teilweise, Chrom, Vanadin, Nickel und Kobalt sehr weitgehend der Silicatschmelze entzogen.

Nach diesen Erstkristallisationen scheiden sich als Hauptkristallisationen vorzugsweise die so wichtigen Mineralfamilien: Feldspate, Pyroxene und Amphibole (besonders Augite und Hornblenden), sowie Glimmer aus. Als Restkristallisation führt Goldschmidt noch Alkalifeldspate, Glimmer und Quarz auf. Daneben scheiden sich als selbständige Minerale Verbindungen solcher Elemente aus, die nicht mit den vorherrschenden gesteinsbildenden Elementen im gewöhnlichen Sinne isomorph sind.

So kann man sich vorstellen, daß eine gleichsam fraktionierte Kristallisation des Urmagmas vor sich geht, wobei eine allmähliche Stoffsonderung in der Silicathülle stattfand und wohl noch stattfindet. Außer durch das Schwerefeld und den Auftrieb kann eine Trennung der Kristallisationen vom Magmenrest auch durch Ausquetschung erfolgen <sup>4)</sup>.

Zu dem Bisherigen kommt noch hinzu, daß unter dem hohen Druck in der Tiefe der Erde sich noch andere, dichtere Minerale bilden können, als die in der Nähe der Erdoberfläche. Das wird besonders der Fall sein, wenn Kristallisationen nahe der unteren Grenze der Silicathülle stattfinden, also in etwa 1000 km Tiefe, wo 30 000 Atm. herrschen sollen. Auf solche Minerale hat Pentti Eskola 1920 aufmerksam gemacht und ihre Eigenheiten studiert. Er nennt sie Eklogite. Sie nehmen ein bis zu 20 % kleineres Volum ein (Dichte 3,6—4) als die unter geringerem Druck entstandenen Mineralien und sind nur bei hohem Druck beständig oder wenn sie — etwa durch vulkanische Explosionen — sehr schnell nach oben befördert wurden. Bei Druckverminderung werden sie instabil und wandeln sich unter Schmelzung oder trocken in leichtere Silicate um.

Zu den unter sehr hohem Druck gebildeten Mineralien gehört bekanntlich auch der Diamant, der sich z. B. in den Explosionskanälen findet, die der südafrikanische Kimberlit durch die Erdoberfläche gesprengt hat. An diesem Vorkommen suchte Goldschmidt einen zahlenmäßigen Begriff von der Tiefe zu gewinnen, aus der dieses Material stammt und fand, daß der Diamant in einer Tiefe von mindestens 60 km entstanden sein muß. Da mit dem Diamant auch Eklogite dort vorkommen, so nimmt Goldschmidt an, daß sie gleichzeitige Bildungen sind und geologische Verhältnisse sprechen dafür, daß sie den oberen Teilen der Eklogitschale angehören. Als Grenze gegen die Sulfid-Oxydschale setzt Goldschmidt eine Tiefe von etwa 120 km, entsprechend der Tiefe der geodätisch festgestellten isostatischen Ausgleichfläche, d. h. einer Fläche, die den verschiedenen starken Drucken darüber lastender Gesteinsschichten so nachgibt, daß sich alle Teile mehr oder minder vollständig im hydrostatischen Gleichgewicht befinden.

Die Grenze zwischen Eklogitschale und den leichteren Silicatgesteinen ist natürlich nicht als absolut scharf zu

denken, sondern so, daß die spezifisch schwereren Mineralien, die zu den Eklogiten zu rechnen sind, sich bei der Druckzunahme eines nach dem anderen einstellen.

Die Eklogitschale, die Goldschmidt in einer Tiefenerstreckung von 120—1200 km annimmt, und die aus komprimierten nur unter hohem Druck beständigen Silicaten besteht, tritt an die Stelle des früher angenommenen flüssigen Magmas. So haben wir im Sinne V. M. Goldschmidts unter der Atmosphäre und Hydrosphäre zuerst bis etwa 120 km Tiefe eine Schicht von Silicaten des mittleren spezifischen Gewichts 2,8. Darunter in allmählichem Übergang bis zu rund 1200 km Tiefe eine Schicht komprimierter Silicate, eben die Eklogitschale<sup>5)</sup>, mit einer Dichte von 3,6—4.

Chemisch unterscheiden sich die Silicate dieser beiden obersten festen Erdschichten besonders durch den Gehalt an Kieselsäure, Eisen, Magnesium, Calcium u. a.

Als Typus der Silicate vom spezifischen Gewicht bis 2,8 hat man den Opdalit aufgestellt und wir lassen seine chemische Zusammensetzung im Vergleich mit der mittleren Zusammensetzung der Eklogite folgen:

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO
Opdalit . .	62,25	0,94	15,15	0,96	4,49	0,07	3,92	4,47
Eklogit . .	46,26	0,28	14,45	4,41	5,82	—	11,99	11,66

	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	S	Cl
Opdalit . .	3,30	3,50	0,57	0,16	0,06	0,04	0,06
Eklogit . .	2,45	1,51	1,10	—	—	—	—

Unter der Eklogitschicht folgt dann bis zu etwa 2900 km Tiefe die Sulfid-Oxydschicht, von der wir oben redeten und darunter der Nickeleisenkern.

An die Stelle oder neben die älteren Bilder vom Aufbau des Körpers tritt nun das von V. M. Goldschmidt angegebene folgende:

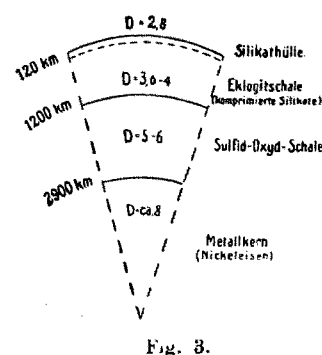


Fig. 3.

Alle die physiko-chemischen Vorgänge, die wir bisher betrachtet haben, vollzogen sich im Innern der Erde und Goldschmidt nennt sie deshalb deren „inneren Stoffwechsel“. Da, wo die Erdoberfläche aber mit der Atmosphäre und Hydrosphäre in Berührung ist, setzen andere chemische Reaktionen ein, die dieser Forscher den „äußeren Stoffwechsel“ der Erde genannt hat und durch Vorgänge wie Witterung, Erosion und Sedimentation ausgelöst werden. Auch hier haben physikalisch-chemische Untersuchungen vielfach wesentliche Aufklärung gegeben, doch wollen wir von ihrer Darstellung zunächst absehen.

<sup>5)</sup> Silicatgesteine der Eklogitfazies können sich auch in der oberen Silicathülle lokal und regional bilden, wenn z. B. durch gebirgsbildende Kräfte lokale Druckerhöhungen eintreten. So gibt es z. B. alpine Eklogite.

<sup>4)</sup> Oft enthalten Gase oder Dämpfe, die sich bilden, auch flüchtige Verbindungen von Schwermetallen besonders von Halogenverbindungen derselben. Diese bewegen sich dann, entgegen der sonst herrschenden Tendenz der Schwermetalle in die Tiefe zu sinken, nach oben. Auch wässrige Lösungen solcher Schwermetalle können abgetrennt werden, die dann ebenfalls nach oben steigen. Auf diese Weise dürfte der größte Teil der uns zugänglichen Schwermetallagerstätten entstanden sein. Eine Reihe wichtiger Eisenlagerstätten dürfte sich so gebildet haben, daß ihr Eisenmaterial in leichten, kieselsäurereichen Silicatmagmen gelöst war und auf diese Weise den nötigen Auftrieb erhielt.

Zu ähnlichen Resultaten wie Goldschmidt kommt G. Tammann bei der Betrachtung beschränkterer Verhältnisse. Auch er geht aus von Ergebnissen der Erdbebenkunde, nach denen die Erde außer der Atmosphäre und Hydrosphäre aus einem Mantel von 1500 km Dicke von der durchschnittlichen Dichte 2,9, einer mittleren Schicht von 1400 km Dicke und Dichte 5,6 und dem Kern von einer Dichte 9,6 besteht. Mit den Dichten steht es in Übereinstimmung, wenn man den Mantel als aus Silicaten, die mittlere Schicht als aus Sulfiden der Schwermetalle und den Kern als aus Metallen bestehend annimmt. Seinen Vergleich der Schichten des Erdballs mit dem flüssigen Inhalt eines Tiegels, in dem diese Bestandteile enthalten sind, haben wir bereits erwähnt. Wie hier zwischen den Schichten Gleichgewicht herrscht, so nimmt es Tammann auch bei den Schichten des Erdballs an. Wenn man die Zusammensetzung einer dieser Schichten kennt, so kann man nicht nur auf die Zusammensetzung der zweiten, sondern auch auf die der dritten Schlüsse ziehen. Nun kennt man, wie oben angegeben, die Zusammensetzung der obersten Erdschicht für viele ihrer Teile. Da diese Verhältnisse aber kompliziert und lückenhaft sind, so hat Tammann nur Teile des Problems auf Grund metallurgischer Erfahrungen in Angriff genommen und versucht zunächst, die Verteilung der metallischen Elemente zwischen der Silicatschicht und dem Metallkern in qualitativer Weise festzustellen. Als Grundprinzip stellt er folgenden Satz auf: Die Verteilung eines Metalls zwischen dem flüssigen Silicat und dem Metall erfolgt in der Weise, daß das unedlere, elektro-positivere Metall zum größten Teil in das Silicat geht und das edlere aus dem Silicat in das Metall. Dabei setzt er die Reihenfolge der Metalle vom unedelsten zum edelsten bei jener hohen Temperatur gleich der Reihenfolge der Metalle in den Lösungen ihrer Salze bei 20°, wenn in diesen Lösungen je ein Mol Kation im Liter Wasser enthalten ist. Diese Reihenfolge entspricht auch der Reihenfolge der Bildungswärmen der Chloride, und somit sind die Reaktionen zwischen einem freien unedleren Metall und dem Chloride des edleren Metalls exotherm. Und wie aus den Schmelzen der Chloride das unedlere Metall das edlere in Freiheit setzt, indem das Chlorid des unedleren gebildet wird, so auch bei den Silicaten. Hierfür bringt Tammann auch experimentelle Belege.

Die Reihenfolge der Metalle der Erdkruste vom unedleren zum edleren ist nun die folgende, wobei hinter dem Element jedesmal der Prozentgehalt seines Vorkommens in der Erdkruste (Silicatschicht) angegeben ist:

K (2,6); Na (2,8); Li (0,003); Ca (3,6); Sr (0,018); Ba (0,048); Ce, La (0,001); Al (8,1); Mg (2,1); Mn (0,1); Cr (0,04); Zn (0,0001); Fe (5,1); Cd (0,00001); Co (0,001); Ni (0,02); Pb (0,0001); Sn (0,00001); Bi (0,000001); Sb (0,00001); H (0,127); V (0,02); Cu (0,032); Ag (0,000001); Hg (0,00001); Au (0,0000001); Pt (0,00000001).

Da die Silicatschale reich an Eisen ist, so können die Metalle, die links vom Eisen stehen, im Metallkern nur in Spuren vorkommen. Die Metalle dagegen, die edler als Eisen sind, können in viel größeren Mengen im metallischen Kern vorhanden sein als in der Silicathülle. Hierher gehören Wasserstoff, Nickel, Vanadin und in weitem Abstand Kupfer. Von diesen dürfte sich der Wasserstoff freilich nur in der allerersten Erdkruste befinden, da er zum größten Teil als Wasser in die Eruptivgesteine eingewandert ist. Vanadin, Zinn und Antimon dürften in den Metallkern deshalb nicht eingehen, weil sie in der eisenoxydhaltigen Silicatschmelze als Anionen gebunden werden. Der Nickelgehalt der Silicathülle beträgt nur 0,004 des Eisengehaltes, und da Nickel edler als

Eisen ist, so muß das Verhältnis im metallischen Kern zugunsten des Nickels stark zunehmen. Wächst es auf das Zweieinhalbfache an, dann würde der Nickelgehalt des besonders aus Eisen bestehenden Kerns 10% betragen, was mit dem Nickelgehalt mancher Meteore übereinstimmt.

Was nun den Gehalt des Metallkerns an Blei, Wismut, Silber, Gold und Platin anbetrifft, so kann er nur gering sein, selbst wenn er zehntausendmal größer wäre als in der Silicatschmelze. Somit kommt auch Tammann zu dem Resultat, daß der Erdkern vorzugsweise aus Nickeleisen besteht, dessen mittlerer Nickelgehalt dem des meteorischen Eisens entspricht.

Schwieriger und hypothesenreicher ist es, etwas über die Schicht zwischen der Silicatschale und dem Metallkern zu sagen. Ihre Dichte 5,6 entspräche einer Mischung von 20% Eisen, 70% FeS, 10% FeO und Silicat, die bei 20° und 1 Atm. Druck eine Dichte von 5,2 haben würde. Während Fe und FeS sich flüssig in allen Verhältnissen mischen, tritt bei Zusatz von Eisensilicat Entmischung in eine Eisen- und FeS-reichere Schicht ein unter Bedingungen, die Tammann genau festlegen konnte. So kam es bei der allmählichen Abkühlung der Erde zur Bildung eines Metallkerns und einer Sulfidschale, die etwa obige Zusammensetzung und natürlich noch andere Metallsulfide in geringeren Mengen enthält.

Nun ist der Schwefelgehalt der Eruptivgesteine nur 0,05%, und das scheint gegen die Annahme einer sulfidischen Mittelschicht zu sprechen, zumal bei metallurgischen Prozessen die flüssigen Schlacken über den Mischungen von Sulfiden, wie FeS, CuS u. a., etwa die zehnfache Menge S enthalten. Aber Goldschmidt weist darauf hin, daß die Zahl 0,05% sich auf die jetzigen Gesteine und nicht auf die primäre Silicatphase, von der man ausging, bezieht. Diese Phase hat sicher erheblich mehr Schwefel enthalten und ihn durch die Umwandlungen größtenteils verloren. Dann kann aber auch ein Teil des Schwefels in der sulfidischen Schicht durch Phosphor, Silicium und andere Elemente ersetzt sein, eine Annahme, die man zunächst um so mehr machen kann, als man im meteorischen Eisen neben Einschlüssen von FeS (Troilit) auch solche von Phosphornickeleisen fand.

So schätzt Tammann den Gehalt der drei Hauptschichten der Erde an den wichtigsten Bestandteilen wie folgt:

	Dicke der Schicht km	Dichte	
Silicatschicht	0 – 1500	2,9	1(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, CaO, MgO, K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O), 1,5 SiO <sub>2</sub>
Sulfid. Schicht	1500 – 2900	5,6	FeS, Fe <sub>3</sub> P, FeO, Fe, SiO <sub>2</sub>
Metallkern	2900 – 6370	9,6	Fe (88 <sup>0</sup> / <sub>100</sub> ), Ni 8 <sup>0</sup> / <sub>100</sub> , Fe:SP 3 <sup>0</sup> / <sub>100</sub> , edlere Metalle 1 <sup>0</sup> / <sub>100</sub>

Bei V. M. Goldschmidt und Tammann herrscht im allgemeinen Übereinstimmung über den Schalenbau der Erde. In Einzelheiten sind natürlich verschiedene Auffassungen vorhanden, wie das bei der Kompliziertheit der Fragen nicht anders zu erwarten ist. Von anderer, besonders mineralogisch-geologischer Seite wurden aber auch da, wo die obigen zwei Forscher einig sind, Zweifel an den gemachten Annahmen geäußert. Das ist besonders bei der Sulfidschale der Fall, deren Existenz mehrfach bestritten wird. G. Linck in Jena hat sich darüber und über die Bildung und den Aufbau des Erdballs zusammenfassend geäußert<sup>\*)</sup>. Er meint,

<sup>\*)</sup> Aufbau des Erdballs. Jena 1924, G. Fischer.

daß die Ableitung einer Sulfidschale im Erdinnern zwar theoretisch einwandfrei ist, daß aber keine experimentellen Anzeichen für die Riesenmengen Schwefel, die in Form von Sulfiden etwa ein Drittel des Erdkörpers erfüllen sollen, vorhanden sind. Auch gegen die Eklogitische Goldschmidts bringt er vom mineralogisch-petrographischen Standpunkt eine Reihe von Einwänden und erklärt die Zunahme der Dichte nach dem Erdinnern zu nicht allein durch die stofflichen Änderungen, sondern auch durch eine dichtere Packung der Teilchen, wie wir das bald sehen werden.

Das Bild, das Linck von den Veränderungen eines Gasballs im Weltenraum, der die irdischen Elemente enthält, bei der allmählichen Abkühlung entwirft, ist das folgende. Zunächst findet eine Art von Schichtung der Gase, entsprechend ihrer Schwere, statt, jedoch so, daß ein Gas, welches innen ist, auch in den äußeren Schalen im Verhältnis seiner Gesamtmenge vorkommt. Bei der höchsten Temperatur folgen so die Elemente von außen nach innen in der Reihenfolge der zunehmenden Atomgewichte, also z. B. Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, Natrium, Magnesium, Aluminium, Silicium, Eisen, Nickel usw. Kühlt sich die Erde nun ungleichmäßig ab, z. B. an den Polen stärker als am Äquator, so entstehen Konvektionsströme, die einen regelmäßigen Schalenaufbau stören und eine stärkere Mischung der Gase bewirken. Ist die Abkühlung aber eine gleichmäßige, so sinken die abgekühlten Teilchen in die Tiefe, erwärmen sich dort und steigen wieder auf. Bei der weiteren Abkühlung gehen die Nichtmetalle in den zweiatomigen Zustand über, wobei in der obigen Reihenfolge der Kohlenstoff an die dritte, der Sauerstoff an die sechste, das Silicium an die neunte und der Schwefel an die zwölfte Stelle rückt. Sonst bleibt alles und im Innern des Gasballs muß eine höhere Temperatur herrschen als in der Hülle. Schreitet die Abkühlung weiter fort, so verbinden sich die Elemente miteinander, und zwar entstehen zunächst Oxyde und Sulfide der Metalle entsprechend der Stufenleiter der Affinitäten. Der Reihe nach folgen die Oxyde des Calciums, Magnesiums, Aluminiums, das Sulfid des Calciums, die Oxyde des Natriums und Siliciums, das Sulfid des Natriums, das Oxyd des Kaliums, die Sulfide des Kaliums und Magnesiums, die Oxyde des Schwefels, Wasserstoffs, Eisens, Nickels, Kohlenstoffs usw. Da nun bei der Erde nicht genügend Sauerstoff und Schwefel vorhanden ist, so bleibt ein entsprechender Teil der zuletzt genannten edleren Metalle in gediegenem Zustand übrig. Die Hauptmenge des Wasserstoffs ist schon vorher wegen der Temperatur des Weltkörpers einerseits und wegen dessen relativ geringer Masse andererseits in den Weltenraum entwichen. Der Rest hat sich mit Sauerstoff zu Wasser vereinigt und bildet um den zentralen Körper zunächst eine mit anderen Gasen gemischte Wasserdampf-atmosphäre. Bei der fortschreitenden Abkühlung kommt es zur Verflüssigung der Stoffe, wobei dann Säuren und Basen miteinander reagieren können. Da die vorwiegende Säure die Kieselsäure ist, bilden sich Silicate, und es ist ein Stadium denkbar, wo der Gasball einer Seifenblase vergleichbar ist, in der die Haut aus feurig-flüssigen Silicaten besteht. Allmählich zieht sich infolge der weiteren Abkühlung der Gasball mehr und mehr zusammen, die flüssige Hülle wächst. In ihr werden sich dann Kristalle abscheiden, und zwar nach der Stufenleiter der Affinitäten zuerst Alkali-Aluminium-silicate, oder nach den Erfahrungen an irdischen Schmelzflüssen von ähnlicher Zusammensetzung zuerst

die Silicate des Eisens und Magnesiums. Erstere würden als die leichteren aufsteigen, letztere absinken und die Hülle des Balls nach außen reicher an Alkali, Aluminium und Kieselsäure, nach innen reicher an Eisen, Magnesium und vielleicht an Calcium werden. Die absinkenden Mineralien werden in den heißeren Zonen zunächst immer wieder eingeschmolzen, während die aufsteigenden erhalten bleiben und allmählich eine feste Rinde bilden. Von kieselsäurereichen Mineralien, welche einsinken, kann man nach praktischen Erfahrungen annehmen, daß sie bei der hohen Temperatur der Tiefe in schwerere kieselsäureärmere und leichteres freies Siliciumdioxid zerfallen, das aufsteigt und sich in der Rinde als Quarz abscheiden kann. So entsteht allmählich eine feste Rinde von der Zusammensetzung etwa des Granits, darunter eine flüssige Masse von basischer Zusammensetzung und einem Kern, der in seinen äußeren Teilen aus dissoziierten Silicaten besteht, nach innen aber immer mehr Eisen und Nickel enthält, bis diese beiden zuletzt allein den Kern erfüllen. In dem Maße, wie die Rinde dicker und fester wird, schreitet die Abkühlung naturgemäß langsamer voran, aber schließlich wird auch der innerste Kern starr, und bei der Erde nimmt man mit guten Gründen an, daß er doppelt so starr ist wie Stahl bei gewöhnlicher Temperatur und Normaldruck. Bei der fortwährenden Kontraktion des Erdkörpers entstehen radiale Risse und Verschiebungen. Hat die Oberfläche eine Temperatur erreicht, die unter der kritischen Temperatur des Wasserdampfes liegt, so fällt der erste Regen und es sammeln sich allmählich in den Einsenkungen der Oberfläche die Meere. Nach der Scheidung von Wasser und Land beginnt dann auf der Oberfläche eine Umwandlung chemischer und mechanischer Art, die zur Bildung der Sedimentgesteine führt und zu dem Bilde, das uns heute die Oberfläche der Erde bietet.

Sieht man von der Atmosphäre und Hydrosphäre ab, so entstehen nach Linck bei dem betrachteten Erkaltingsprozeß des Gasballs nur zwei wesentlich verschiedene Zonen, die allmählich ineinander übergehen: die Silicathülle und der Metallkern. Die Silicathülle wird von außen nach innen allmählich immer ärmer an Kieselsäure, Tonerde und Alkalien, aber reicher an Magnesium und Eisen. Danach könnte sich für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen nur eine starke Unstetigkeit an der Grenze zwischen Steinhülle und Metallkern zeigen. Es sind aber mehrere nachgewiesen, und um sie zu erklären, verläßt Linck den üblichen Gedankengang auf Grund der Aggregatzustände „fest“, „flüssig“ und „gasförmig“. Während man mit diesen Begriffen Vorstellungen über die Größe der Körperteilchen, ihre Verschiebbarkeit, ihre Raumauffüllung verbindet, arbeitet er statt mit den Begriffen „fest“ und „flüssig“ mit „kristallisiert“ und „amorph“. Es ist nämlich der Übergang vom festen zum flüssigen Aggregatzustand, der hier in Betracht kommt, ein ganz allmählicher, ohne scharfe Grenzen, und hängt nur von dem Grade der inneren Reibung ab.

Um die Unstetigkeiten in der Struktur der Materie, die die Erdbebenforschung festgestellt hat, und die Zunahme der Dichte mit zunehmender Tiefe zu erklären, denkt sich Linck die Verhältnisse ähnlich wie bei der Raumerfüllung von Bauten und Bausteinen. In der äußersten Hülle können geräumige Molekularbauten, wie es die kristallisierten Körper sind, existieren. Mit zunehmender Tiefe, also bei immer zunehmender Temperatur und wachsendem Druck, müssen die Moleküle



immer enger gelagert sein, die kristallisierten Körper gehen in amorphe über, die kleinere Massenteilchen als die kristallisierten enthalten. Und während diese zu ihrem Bestand eine Anzahl von Molekülen erfordern, können jene aus nur einem Molekül bestehen. In noch größerer Tiefe findet Dissoziation statt und zuletzt zerfallen die Moleküle in Atome, wodurch eine weitere Raumverringering stattfindet, ähnlich wie die Bausteine nur einen Bruchteil des Raumes eines Hauses einnehmen. Im Sinne dieses Gedankengangs leitet Linck ab, daß in 60 km Tiefe die Erdmaterie aus dem kristallisierten in den glasig amorphen Zustand übergegangen ist, wodurch eine erste Unstetigkeitsfläche entstand. In 1200 km Tiefe sind die Silicatmoleküle an der Grenze ihrer Existenzmöglichkeit angekommen, sie treten in den Dissoziationszustand ein, wodurch die Massenteilchen wieder kleiner werden, die Dichte also zunimmt (zweite Unstetigkeitsfläche). Die Silicatmoleküle zerfallen mit zunehmender Tiefe mehr und mehr und bei 1700 km Tiefe können nur noch kleine Moleküle (Oxyde, Sulfide) bestehen, die bis etwa 2400 km Tiefe existieren können. Bei 2900 km Tiefe sind nicht nur noch einatomige Stoffe vorhanden, sondern es ändert sich auch der Stoff, indem nur noch Nickeleisen den Rest erfüllt, wodurch wieder eine sehr erhebliche Unstetigkeitsfläche im Aufbau des Erdballs entstanden ist. So ergibt sich nach Linck, daß, abgesehen von der stofflichen Änderung, auch die mehr oder minder dichte Packung als Ursache für die Zunahme der Dichte betrachtet werden kann.

Wir sehen, daß in den Ansichten über den Aufbau des Erdballs trotz vielfacher Übereinstimmung noch keine Einheitlichkeit herrscht, aber der Fortschritt, der auf Grund physikalischer und chemischer Forschungen gemacht wurde, ist unverkennbar und man kann sich von der Weiterführung dieser Arbeiten in vieler Hinsicht Erfolge versprechen. Wir werden seinerzeit darüber berichten.

Zum Schlusse sei noch kurz auf den Einfluß hingewiesen, den die Lehre von der Radioaktivität auf geologische Probleme ausgeübt hat<sup>7)</sup>. Wie auf anderen Gebieten, so hat diese verhältnismäßig noch so junge Wissenschaft auch hier nicht nur Klärung vieler Fragen, sondern auch ganz neue Gesichtspunkte gebracht. Wir weisen nur darauf hin, daß man sich Vorstellungen machte, wie sich auf Grund radioaktiver Prozesse Weltkörper bilden und wie sie zerfallen können. Wir sehen auch ab von den Arbeiten, die auf Grund der Gesetze des radioaktiven Zerfalls, Altersbestimmungen der Gesteine, der festen Erdkruste durchführten. Aber die Ansichten über den Wärmehaushalt der Erde, die sich auf Grund der Wärmeentwicklung der radioaktiven Substanzen der Erdkruste ergaben, sind mit Rücksicht auf unsere obigen Betrachtungen so bedeutsam, daß wir sie noch anschließen wollen.

Wie wir sahen, hat man durch Messungen in einer Reihe von Bohrlöchern festgestellt, daß die Temperatur der Erde mit der Tiefe zunimmt, und zwar für rund 30 m um 1°. Die Beobachtungen gehen nur bis wenig über 2 km Tiefe. Extrapoliert man nun bei linearer Zunahme die Temperatursteigerung nach dem Mittelpunkt der Erde, so käme man auf mehrere hunderttausend Grad. Ein solcher Wert ist mit Rücksicht auf den Bestand unserer Erde undiskutierbar und so haben schon

früher mehrere Forscher, wie Lord Kelvin, Wiechert u. a. eine Temperaturzunahme nach einer geometrischen Reihe angenommen und Wiechert kam so auf ein Temperaturmaximum von 3000° im Innern der Erde.

Viele Messungen haben nun gezeigt, daß die meisten Gesteine unserer Erdkruste radioaktive Bestandteile enthalten. Die Mengen sind in den verschiedenen Gesteinen verschieden und im Durchschnitt klein, in der Gesamtheit aber doch hinreichend, um eine bedeutende Wärmeentwicklung hervorzubringen. Man hat aus dem mittleren Gehalt der festen Erdkruste an radioaktiven Stoffen die Wärme berechnet, die dem Erdkörper durch ihren Zerfall zugeführt wird und sie mit dem Wärmeverlust verglichen, den die Oberfläche der Erde durch Ausstrahlung in den Weltenraum erleidet. Denkt man sich den Urangehalt der Eruptivgesteine der Erdoberfläche gleichmäßig auch in der ganzen Erdkugel enthalten, so ergäbe sich durch den radioaktiven Zerfall ein 150 mal größerer Betrag als der der nötig wäre, um den gesamten Strahlungsverlust der Erde nach dem Weltenraum zu kompensieren. Und führt man die gleiche Rechnung für das Thorium aus, so ergäbe sich dazu ein 130 mal größerer Betrag von Wärme, als nach außen abgegeben wird. Die Folge wäre, daß die Erde sich nicht abkühlen sondern erwärmen würde, und zwar um etwa 40° in einer Million Jahre. Dafür sind gar keine Anzeichen vorhanden, so nimmt man an, daß die radioaktiven Substanzen sich nur in einer dünnen Schicht der Erdrinde befinden, und zwar so, daß die Konzentration in dieser Schicht keine konstante ist, sondern nach der Tiefe hin allmählich abnimmt. Jeffrey hat auf rechnerischem Wege ein exponentielles Gesetz abgeleitet, nach dem die radioaktiven Substanzen mit der Tiefe abnehmen und gelangte durch deren Zerfall in den tieferen Erdschichten zu Temperaturen, die mit den Beobachtungen beim Vulkanismus im Einklang stehen.

So können wir uns jetzt von den Wärmeverhältnissen im Erdkörper folgende Vorstellung machen: In der Atmosphäre und der äußersten Oberfläche unserer Erde werden die Temperaturverhältnisse im wesentlichen durch die Strahlung der Sonne bedingt. Am Tag wird Wärme aufgenommen, in der Nacht ausgestrahlt. Nach dem Innern der Erde kann auch im heißen Sommer keine Wärmeenergie gelangen, weil die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine zu gering ist. Schon in 10 m Tiefe ist eine Wirkung der Sonnenstrahlung nicht mehr festzustellen. Dann wird die Temperaturzunahme entsprechend der geothermischen Tiefenstufe zum größten Teil durch die Wärmeentwicklung der radioaktiven Substanzen in den oberen Schichten der Erdkruste verursacht. Aus dem heißen Erdinnern kann nur ein geringer Teil des Wärmeflusses stammen, weil die Gesteine nur eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Der Erdkern hätte danach noch heute ungefähr dieselbe Temperatur wie unmittelbar nach dem Erstarren der äußeren Hülle. Jeffrey hat eine Maximaltemperatur von 1400° angenommen und berechnet, daß 700 km unter der Erdoberfläche die Abkühlung gegenüber dem Erdinnern bisher nur 8–10° betragen hat, in 300 km unter der Oberfläche dagegen 200–300° und er nimmt in diesen Tiefen Temperaturen von 1100–1200° an. Ohne die Wärme des radioaktiven Zerfalls wäre die Temperatur in der Nähe der Erdoberfläche viel niedriger und es wird bezweifelt, ob wir ohne die radioaktiven Substanzen überhaupt noch vulkanische Tätigkeit auf unserer Erdoberfläche hätten. Weitere Aufsätze über diesen Gegenstand werden später folgen.

<sup>7)</sup> Ausführlicheres findet man hierüber s. O. Hahn: „Was lehrt uns die Radioaktivität über die Geschichte der Erde“. Berlin 1926, J. Springer.