

Besprechungen.

Verschiedene Theorien über die Beziehungen der Radioaktivität zu geologischen Vorgängen.¹⁾

Von Franz E. Suesß.

1. Dutton, Vulcanos and radioactivity. Journal of Geology. (Juni 1906.) Bd. XIV, S. 259 bis 268.

2. R. J. Strutt, On the distribution of radium in the earth's Crust, and on the earth's internal heat. Proceed. of the Royal Soc. 1906, Ser. A, Bd. LXXVII, S. 472 bis 485.

3. G. D. Louderback, The relation of radioactivity to vulcanism. Journ. of Geology 1906, Bd. XIV, S. 747 bis 757.

4. J. Königsberger, Ueber den Temperaturgradienten der Erde bei Annahme radioaktiver und chemischer Prozesse. Phys. Zeitschr. 1906, Bd. VII, S. 297 bis 300.

5., 6. Derselbe, Normale und anormale Werte der geothermischen Tiefenstufe. Zentralbl. f. Min. 1907, S. 673 bis 679. — Xe. Congrès géol. int. Mexico. Compt. rend. 1907, S. 1127.

7. E. Sommerfeldt, Enthält das Erdinnere Radium? Bericht über die 40. Versammlung des Oberrhein. Geologischen Vereines zu Lindau 1907.

8. Elster und Geitel, Ueber Radioaktivität der Erds substanz und ihre mögliche Beziehung zur Erdwärme. Jahresber. d. herzogl. Gymnasiums. Wolfenbüttel 1907.

9. F. v. Wolff, Die vulkanische Kraft und die radioaktiven Vorgänge der Erde. Zeitschr. d. Geol. Gesellsch. 1908, S. 431.

10. G. F. Becker, Relations of radioactivity to Cosmogony and Geology. Bull. Geol. Soc. American. 1908, Bd. XIX, S. 113.

11. Mennel, Radioactivity of rocks. Nat. 1909, S. 67.

12. J. W. Waters, Radioactiv Minerals in common rocks. Phil. Mag. 1909, Bd. XVIII, S. 677 bis 676; 1910, Bd. XIX, S. 903.

13. C. Doelter, Ueber die Stabilität der durch Radium erhaltenen Mineralfarben. Zentralbl. f. Min. 1907, S. 397 bis 399.

14., 15. O. Mügge, Radioaktivität als Ursache der pleochroitischen Höfe des Cordierit. Zentralbl. f. Min. 1907, S. 397 bis 389. — Radioaktivität und pleochroitische Höfe; dass. 1909, S. 65, 113, 142.

16. R. Brauns, Der Einfluß von Radiumstrahlen auf die Färbung von Sanidin, Zirkon und Quarz. Zentralbl. f. Min. 1909, S. 721.

17., 18., 19. J. Joly, Radioactivity and Geology. London 1909. — On the distribution of thorium in the earth surface materials. Phil. Mag. London 1909, Bd. XVIII, S. 140 bis 145. — The amount of thorium in sedimentary rocks. Phil. Mag. 1910, Bd. XX, S. 125 bis 128, 353 bis 357.

20. Gray, Ultimate products of the Uranium d'sintegration series. Phil. Mag. London 1909, Bd. XVIII, S. 816.

21. Mlle. Gleditsch, Sur le radium et l'uranium contenus dans les minéraux radioactifs. Compt. rend. 1908, Nr. 148, S. 1451, Nr. 149, S. 267.

22. G. F. Becker, The age of the earth. Smithsonian Miscell. Collections. Washington 1910, Nr. 6, S. 26.

¹⁾ Vortrag in der Versammlung vom 4. März 1911, ergänzt nach neueren Publikationen.

23. Piutti, Helium in recent minerals. *Le radium*. 1910, S. 178.
24. J. Joly und A. L. Fletcher, Pleochroic halos. *Phil. Mag.* April 1910, S. 630 bis 648.
25. F. Soddy, The relation between Radium and Uranium in minerals. *Phil. Mag.* London 1910, Bd. XX, S. 845. — F. Soddy und Pirret, *dass.* S. 390.
26. C. Doelter, *Das Radium und die Farben*. Dresden 1910.
27. Strutt, Accumulation of Helium in geolog. time. *Proc. of Roy. Soc. London* 1910: 81, 82, 83, 84.
28. Measurement of the rate at which Helium is produced in thorianit and pitchblende, with a minimum estimate of their antiquity. *Proc. of Roy. Soc. London* 1910, Bd. LXXXIV, S. 379 bis 388; ferner zahlreiche frühere Arbeiten und Notizen *dass. und Nature*. London 1910, Bd. LXXXV, S. 5 bis 6.
29. C. Doelter, Ueber die Radioaktivität der Minerale. *Mineralog. Taschenbuch der Wiener Mineralog. Gesellschaft* 1911.
30. H. Poole, On the rate of evolution of heat by pitchblende. *Phil. Mag.* 1911, Bd. XXI, S. 58 bis 62.
- 31., 32. A. L. Fletcher, The radioactivity of the Leinster Granit. *Phil. Mag.* 1911, Bd. XXI, S. 102 bis 111. — Radioactivity of some rocks from the antarctic region. *Phil. Mag.* 1911, Bd. XXI, S. 770 bis 773.
33. F. Soddy und R. Pirret, Ratio between Uranium and Radium in Minerals. *Phil. Mag.* 1911, Bd. XXI, S. 662 bis 658.
34. A. Holmes, The association of lead with Uranium in rock minerals and its application to the measurement of geological time. *Proc. Royal. Soc. London* 1911, Bd. LXXXV, S. 248 bis 256.
35. M. Marckwald, Ueber den Radiumgehalt einiger Uranerze. *Chem. Bericht* 1911, Bd. XLIV, S. 771 bis 775.
36. E. H. Buchner, Investigation on the radium content of rocks. *Proc. Amsterdam* 1911, Bd. XIII, S. 818 bis 819.
37. P. Viereck, Ueber die Radioaktivität einiger Gesteinsarten und deren Verwitterungsprodukte. *Diss. Halle* 1911.
38. A. Gockel, Die Radioaktivität von Gesteinen. *Jahrb. der Radioaktivität und Elektronik* 1911, Bd. VII, Heft 4.
- 39., 40. J. Joly, On a method of investigating the quantity of Radium in rocks and minerals etc. *Phil. Mag.* London 1911, Bd. XXI, S. 134 bis 150. — The age of the earth. *Phil. Mag.* 1911, Bd. XXII. (III. The age of the earth by radioactivity S. 370 bis 380.)

Das Forschungsgebiet des Geologen ist nicht eine bestimmte Klasse von Naturkörpern oder Erscheinungen, wie jenes der anderen Naturwissenschaften, sondern ein einziger komplexer Körper, auf dem sich alle uns näher zugänglichen Erscheinungen der organischen und anorganischen Welt vollziehen. So verlangt die Geologie mehr als andere Naturwissenschaften eine beständige Umschau nach den Wandlungen und Fortschritten in anderen exakten und beschreibenden Wissensgebieten, u. zw. nicht nur so weit sie irdische Objekte betreffen; auch auf die Erscheinungen des gesamten außerirdischen Kosmos muß sich der Geologe in manchen Vergleichen und Schlussfolgerungen beziehen.

Bei der stets zunehmenden Spezialisierung der Wissenschaft wird es für den einzelnen immer schwieriger, ja fast unmöglich, alle Beziehungen zu den mannigfachen in Betracht kommenden Wissensgebieten im Auge zu behalten. Dies mag es rechtfertigen, wenn ich hier versuche, in Kürze Bericht zu erstatten über die Ansichten, welche von verschiedenen Forschern geäußert wurden, über die Beziehungen radioaktiver Vorgänge zur Erdgeschichte. Die Literatur hat bereits in wenigen Jahren bedeutenden Umfang erreicht. Ein Teil derselben, darunter das Wichtigste, ist oben angeführt; wobei die Untersuchungen die weiteren Schicksale der aus den radioaktiven Stoffen abgeschiedenen Emanation, die Radioaktivität der Thermalquellen und der Atmosphäre betreffend, hier außer acht gelassen wurden. Auf weitere Aufsätze allgemeineren Inhaltes wird gelegentlich im Texte verwiesen.

Eine beträchtliche Fülle von Beobachtungsmaterial wurde bereits aufgestapelt und man sieht aus dieser Saat mit großer Ueppigkeit und Schnelle kühne und umfassende Hypothesen emporsprießen. Die werdende Wissenschaft der Radiogeologie kann freilich erst auf wenige gefestigte Ergebnisse hinweisen.

In vielen Punkten sind die Auffassungen der einzelnen Forscher sehr verschieden; viele Daten werden durch neue Forschungen stets verschoben, so daß die oft kühnen Folgerungen auf unsicherem Unterbau zu stehen scheinen. Aber schon die Ziele der neuen Forschung und die ersten Schritte auf dem neuen Wege verdienen unsere Aufmerksamkeit und erregen unsere Spannung auf das Kommende.

Es wurde bereits versucht, die ganze Reihe geologischer Grunderscheinungen: den Wärmehaushalt des Erdinnern, Vulkanismus und Gebirgsbildung mehr oder minder ausschließlich auf radioaktive Strahlung zurückzuführen.

Aus der Anhäufung der Zerfallsprodukte radioaktiver Stoffe erwartet man Aufschluß über deren Bildungsalter und die Erfüllung eines alten Verlangens unserer Begriffswelt: die numerische Bestimmung geologischer Zeiträume, erscheint nicht mehr gänzlich hoffnungslos.

Einzelphänomene der Kristallisation und Färbungen an zahlreichen Mineralen erwarten ihre Deutung aus radioaktiven Vorgängen.

Die Verbreitung radioaktiver Substanzen und ihrer Zerfallsprodukte in Quellen, in der Atmosphäre und die ganz allgemeine Verbreitung und Verteilung der radioaktiven Substanzen auf der Erde sind Fragen, zu deren Lösung auch der Geologe mit seinen Erfahrungen beitragen muß.

Diese letzteren Fragen wurden wieder in Verbindung gebracht mit den grundlegendsten, kosmogenetischen Problemen, den Theorien der Entwicklung der Materie und des Systems der irdischen Elemente überhaupt. Auch hier wird die kritische Einsprache des Geologen stellenweise am Platze sein.

Zahlreiche, rein wissenschaftliche und populäre Bücher und Schriften gehen nun fast beständig in die Welt, um die Kenntnis von den Erscheinungen und Theorien der Radioaktivität allgemein zu verbreiten. Es sei hier nur an die erste Entdeckung durch Henri Becquerel (1896) in Paris erinnert, daß Uransalze durch schwarzes Papier und durch Aluminiumblech hindurch in stande sind, photographische Wirkungen hervorzurufen. Diese Eigenschaft hat nichts zu tun mit der Phosphoreszenz der Salze, welche Becquerel zuerst zu den Versuchen veranlaßt hatte. Die Becquerel-Strahlung, eine Eigenschaft aller Uranverbindungen in jeder Form, bleibt unabhängig von der Zufuhr irgendeiner elektrischen oder sonstigen Energie und erwies sich als eine Eigenschaft der Uranatome selbst.

Noch bedeutungsvoller als die Entdeckung photographischer Wirkung war die Erkenntnis Becquerels, daß die Strahlen die Fähigkeit besitzen, die Luft elektrisch leitend zu machen. Schmidt (Erlangen) und Mme. Curie erkannten bald (1898) die gleichen Eigenschaften an dem ähnlichen Metalle Thorium (Gasglühlicht). Die beiden Elemente Uran und Thor, an denen die sogenannte Erscheinung der Radioaktivität zuerst festgestellt wurde, sind zugleich ausgezeichnet durch das höchste Atomgewicht; es sind die schwersten bekannten Grundstoffe.

Mme. Curie suchte das Element Uran rein zu sondern, um die stärkste Aktivität zu erhalten. Es zeigte sich, daß manche Verbindungen und Minerale diese Eigenschaft in höherem Maße besaßen als das Metall Uran selbst; insbesondere war dies der Fall bei Barium- und Wismutpräparaten, die aus der Joachimsthaler Pechblende gewonnen waren und bei der Pechblende selbst. Sorgfältige chemische Trennungen bestätigten die Vermutung, daß nicht das Uran selbst, sondern ein Begleiter von anderem chemischen Verhalten, der Träger dieser merkwürdigen Eigenschaft sei. Dies führte zur Entdeckung des Radiums im Jahre 1900, dessen Strahlung und Energieabgabe jene des Uran oder Thor um das millionenfache übertrifft. Das in der Folge entdeckte radioaktive Polonium erwies sich als ein Glied der Zerfallsreihe des Radiums (Ra F).

Debiérne fand später in der Pechblende noch ein weiteres selbständiges radioaktives Element, das Actinium; vermutlich der Ausgangspunkt einer selbständigen Zerfallsreihe, dessen Aktivität aber nur 28% jener des Uran beträgt. (Boltwood, Am. Journ. of. Science. 1908.)

Ein näheres Eingehen auf die fesselnden und für die physikalisch-chemischen Vorstellungen so entscheidenden Ergebnisse der Radiumforschung gestattet nicht das Thema meines Vortrages. Ich muß absehen von einer näheren Betrachtung der verschiedenen Strahlenarten; der atomistischen α -Strahlung, der aus Elektronen bestehenden β -Strahlung und der als Atomschwingungen den Röntgenstrahlen vergleichbaren γ -Strahlung. Ebenso muß ich darauf verzichten näher einzugehen, auf die Ableitung und Berechnung der Zerfallsreihen der radioaktiven Metalle und der folgeschweren Theorien des Atomzerfalles und der Umwandlung der chemischen Grundstoffe, welche nach Rutherford die Erscheinung der Radioaktivität erklären und unseren Blick in der Richtung des unendlich Kleinen in ungeahnter Weise erweitert haben. Alle die wunderbaren Feinheiten der physikalischen Berechnung und Untersuchung, welche gestatten, die Geschwindigkeit der abgeschleuderten α -Teilchen, deren Maße und Zahl zu bestimmen, ja selbst deren Einzeleffekte zu zählen und zu photographieren (Geiger und Rutherford, Phil. Mag. [6], 1910, Bd. XX, S. 691; Duane, Compt. rend., Paris 1910, S. 228.), die Berechnung der elektrischen Ladungen u. v. a. muß hier beiseite gelassen werden.

Es sind vielmehr nur die Endergebnisse und gewissermaßen die größeren Effekte der radioaktiven Vorgänge, welche für den Standpunkt des Geologen in Betracht kommen; u. zw. stehen zwei Momente im Vordergrund: 1. Die radioaktiven Umwandlungen der Stoffe, welche nach allen physikalischen Erfahrungen als ungemein langdauernde Prozesse gleichmäßig verlaufen; von ihnen erwartet man Aufschluß und ziffernmäßige Anhaltspunkte über die Dauer geologischer Epochen und 2. die Wärmeerzeugung radioaktiver Stoffe während ihres Zerfalles. Sie ist geeignet, in hohem Maße die Vorstellung von dem Verlaufe der Erhaltung des Erdkörpers und von deren Zeitdauer zu beeinflussen und verlangt eine Nachprüfung der Theorien über den Ablauf der in der Erde angehäuften Energie, welche in den vulkanischen und gebirgsbildenden Vorgängen zum Ausdrucke kommt.

Dazu kommt noch die unmittelbare Wirkung der radioaktiven Strahlung auf die Farbe und Kristallisation vieler Minerale, die nicht nur von rein mineralogischem Interesse ist, sondern auch über deren Bildungsbedingungen und vielleicht auch über die Dauer der Einwirkungen (pleochroitische Höfe) geben soll.

Ein reiches Beobachtungsmaterial kann bereits diesen Fragen gegenübergestellt werden Dank der Untersuchungen von Rutherford, Boltwood, Strutt, Waters, Joly, Soddy, Doelter, Gleditsch u. a. Mit hypothetischen Anwendungen auf allgemeine geologische Fragen haben sich zunächst G. H. Becker (10, 22) und v. Wolf (9) beschäftigt. Joly hat in seinem Buche „Radioactivity and Geology“ alle hierher gehörigen Tatsachen zusammengefaßt und zu einer Hypothese verarbeitet. Trotzdem dieses Werk erst 1910 erschienen ist, ist bereits manches nach neueren Erfahrungen zu korrigieren und zu ergänzen.

1. Radioaktiver Zerfall und geologische Zeitschätzung. Der Zerfall des Radiums in die hochaktive Emanation und das allmähliche Abklingen derselben kann direkt beobachtet werden. Wie bei allen radioaktiven Stoffen ist die Zerfallsgeschwindigkeit stets direkt proportional der vorhandenen Menge; in 3 Tagen 18 Stunden ist die Menge der Radiumemanation auf die Hälfte gesunken (Halbierungskonstante). Ebenso konnten Ramsay und Soddy (1903) die Umwandlung der α -Strahlen, welche beim Zerfall jeder radioaktiven Substanz abgegeben werden, in Helium direkt nachweisen. Mit dem Zerfall der Emanation tritt das Heliumspektrum im Spektalröhrchen immer deutlicher hervor. Die Menge ist gut meßbar.

Boltwood und Rutherford (Phil. Mag. 1911, Bd. XXII, S. 599) bestimmten neuerdings die Heliumproduktion von 1 g Radium pro Jahr mit 156 mm^3 ; in sehr naher Uebereinstimmung mit früheren theoretischen Annahmen (Rutherford und Geiger 156 mm^3) und den Versuchen von Dewar (189 bis 182 mm^3).

Aus dieser Menge und aus der Zahl der abgeschleuderten α -Teilchen wurde die Halbirungskonstante des Radiums mit 1760 Jahren berechnet.

Durch den beständigen Zerfall müßte das Radium in wenigen Jahrtausenden an Menge sehr abnehmen, im Laufe geologischer Zeiträume vollkommen verschwinden, wenn es nicht beständig vom Neuen erzeugt würde. Hier liefert die ständige Vergesellschaftung mit Uran einen sicheren Anhaltspunkt.

Gleichwie die Höhen der Flüssigkeiten in kommunizierenden Gefäßen bei beständigem und auch schwankendem Durchfluß sich stets im bestimmten Verhältnis zu den Ausflußöffnungen einstellen, in welchem die Zuflüsse und Ausflüsse das Gleichgewicht halten, so bleibt auch das Mengenverhältnis genetisch aneinander geknüpfter radioaktiver Substanzen konstant. In dem Vergleich treten größere und kleinere Umwandlungsgeschwindigkeiten an die Stelle größerer und kleinerer Ausflußöffnungen.

Aus einem Gefäß A mit hohem Flüssigkeitsstand ergießt sich die Flüssigkeit durch eine enge Ausflußöffnung in ein zweites B mit größerer Ausflußöffnung. Wegen des anfänglich höheren Druckes kann, trotzdem aus B sofort neuerlicher Ausfluß stattfindet, die Flüssigkeit bis zu einer gewissen Höhe ansteigen, bis die Ausflußmenge aus B gleich jener aus A wird. Ist die Öffnung in B bedeutend größer, so wird der Höhenunterschied der Druckhöhen auch bedeutend sein. Im Gefäße B kann sich dann nur eine relativ geringe Flüssigkeitsmenge ansammeln. Das Verhältnis der Druckhöhen bleibt aber in allen Fällen konstant.

Reines Uran erzeugt Radium in einem konstanten Mengenverhältnis in der Zeiteinheit. Dieses beginnt sofort von neuem zu zerfallen. Es nimmt an Menge zu bis zu einem Punkt, an welchem sich Zerfall und Neubildung das Gleichgewicht halten. In wenigen Jahrtausenden muß dieser Gleichgewichtszustand erreicht sein. Radium kann somit ebensowenig, wie die Emanation, über einen gewissen Prozentsatz in den Uranmineralen aufgestapelt werden. Man fand eine Bestätigung dieser Ueberlegung in dem stets konstanten Verhältnis von Ur:Ra in verschiedenen Uranmineralen, wie dies nach den Untersuchungen von Boltwood²⁾, Strutt³⁾ und Mc. Coy⁴⁾ erwiesen scheint. Ebenso muß die Gesamtaktivität (vorausgesetzt, daß sie nicht durch Thoriumgehalt beeinflusst wird) dem Uragehalt proportional bleiben und Boltwood prüfte nach vollkommenen Methoden 22 Minerale verschiedener Herkunft und schloß aus den Emanationsmengen auf das konstante Verhältnis Ur:Ra. Nach Boltwood kommen in allen Urmineralen auf 1 g Ur $3\frac{1}{4} \times 10^{-7}$ g Ra. Zur Erzeugung von 1 g Radium werden also unter allen Umständen 3000 kg metallischen Urans notwendig sein.

Boltwoods Untersuchungen haben aber ferner gezeigt, daß die Neubildung aus Uranpräparaten, denen Radium chemisch entzogen wurde, nicht in dem Tempo vor sich geht, wie es die Theorie fordert. (Das wäre ein Millionstel Gramm Radium pro Kilogramm Uran, eine nach gegenwärtigen Methoden leicht nachweisbare Menge.) Auch dies haben die Untersuchungen Boltwoods erklärt. Radium bildet sich nämlich nicht direkt aus Uran; sondern es sind Zwischenprodukte einzuschalten: das Radiouran, Uran A und Jonium, von denen das letztere nach neueren Untersuchungen von Soddy⁵⁾ einen

²⁾ Nature. Mag. 1904, Bd. XXV, S. 80. — Phil. Mag. Apr. 1905.

³⁾ Nature. Mag., 17. März u. 17. Juli 1904, — Proc. Royal. Soc., März 1906.

⁴⁾ Ber. d. chem. Gesellsch. 1904, Bd. XXXVII, Nr. 11, S. 2641. — Phys. Zeitschr. 1907, S. 98.

⁵⁾ Nach Soddy (25) konnte die Neubildung von Radium aus reinem Uran nach einem Verlaufe von vier Jahren noch nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

Minimalwert der Periode von mehr als 30.000 Jahren besitzt. (Phil. Mag. [6] 1910, Bd. XX, S. 342.) Die gesamte Zeit der Halbierung des Urans zu Radium wird mit 6000 Millionen Jahren angenommen. Nach Holmes (34) würde ein Grammolekül Uran in 3200 Millionen Jahren durch ein Grammolekül Radium ersetzt sein.

Die hochaktive, gasförmige Emanation des Radiums zerfällt in eine Reihe weiterer Produkte mit sehr verschiedenen Umwandlungsperioden, von Tagen oder wenigen Minuten; sie werden mit Buchstaben: Radium A bis Radium F (= Polonium) benannt. Als Endprodukt ist ein stabiles Element zu erwarten, welches jedoch wegen fehlender Aktivität in geringen Mengen dem direkten experimentellen Nachweise entgehen muß. Rutherford schloß aus dem Verhältnis der Atomgewichte, daß dieses Endprodukt das Blei sein könne. Das Atomgewicht des Urans wurde mit 238,5 angegeben und unter der Annahme, daß im Laufe der Umwandlung 8 He Atome mit dem Gewicht 4 abgespalten werden, erhält man (238,5—32) das Atomgewicht des Bleis 206,5. (Boltwood, Amer. Journ. Sc. 1907, S. 77.)

Bedeutungsvoller ist die Tatsache, daß alle Uranminerale einen nachweisbaren Gehalt an Blei besitzen; und viel mehr noch der von Boltwood in Uranmineralen mehrerer Fundgebiete anscheinend erbrachte Nachweis, daß verschiedene Uranminerale des gleichen Vorkommens, von denen man gleiches geologisches Alter annehmen kann, den gleichen Bleigehalt aufweisen.

Das Endergebnis der radioaktiven Umwandlung wären somit zwei stabile, nicht aktive Produkte, ein gasförmiges — Helium — auf der einen und ein festes — das Blei — auf der anderen Seite. Nach allen bisherigen Erfahrungen und in Übereinstimmung mit der theoretischen Vorstellung von radioaktiver Umwandlung als interatomistischen, nicht als molekularen Vorgang, bleibt die Bildungsgeschwindigkeit unabhängig von äußeren physikalischen Einflüssen. Erwärmung bis auf 1600° C (Bronson, Proc. Roy. Soc. 78, 190, S. 494; Schmidt u. Czermak, Phys. Zeitschr., Bd. XI, S. 794), Abkühlung bis zur Verflüssigung des Wasserstoffes (Curie u. Dewar, Eve u. Adams, Nature 1907) und hoher Druck bleiben ohne Einfluß auf den Gang der Strahlung; ebenso bleibt der Verlauf des Zerfalles unverändert in Lösungen oder chemischen Verbindungen.

Die Endprodukte, Blei und Helium, für welche es keine Gleichgewichtskonstante gibt, müßten sich somit in uranhaltigen Mineralen proportional der Zeit anreichern. Die Menge dieser Neubildungen sollte eine unmittlere ziffermäßige Zeitschätzung gestatten; und wenn man annimmt, daß ein Teil des Bleis nachträglich weggeführt wurde und nicht sämtliches Helium im Mineral okkludiert geblieben ist, sollten doch die erhaltenen Mengen dieser Stoffe als Vergleichsziffern und als Minimumschätzungen von Wert sein.

Den ersten Versuch einer solchen Schätzung unternahm Rutherford (Phil. Mag. 1906, S. 368) mit Berufung auf die Heliumbestimmung Ramsays und Travers im Fergusonit. Die Umwandlungskonstanten waren jedoch damals noch nicht mit Sicherheit festgestellt und auch die geologische Position des Minerals war aus den Angaben nicht ersichtlich.

Von der allgemeinen spurenweisen Verbreitung der radioaktiven Elemente in den gewöhnlichen Bestandteilen der Erdkruste wird noch unten die Rede sein. Auch das lange unbekannt gebliebene Gas, welches durch sie erzeugt wird, kann fast allenthalben nachgewiesen werden. Mit der Ausarbeitung sehr feiner Methoden zur Heliumbestimmung in Mineralen beschäftigt sich Strutt (27) schon seit mehreren Jahren. Er suchte zunächst insbesondere mineralische Bildungen von extremem Altersunterschied zu vergleichen. Als besonders geeignet und reich sowohl an radioaktiver Substanz als auch an Helium erwiesen sich Phosphatknollen (Koprolithen) und phosphatisierte Knochen. Die Annahme scheint gerechtfertigt, daß sie gleich-

alterig sind mit den einbettenden Schichten und keine Einschwemmung aus älteren Sedimenten stattgefunden hat.

Die Gase wurden aus der Lösung durch Kochen ausgetrieben und zum Teil durch geeignete Mittel (metallisches Calcium, Kali, Natronlauge und flüssige Luft bei -80°) resorbiert. Der Rest, über Quecksilber aufgefangen, ist Helium. Unter den zahlreichen Schwierigkeiten dieser subtilen Untersuchungen ist nicht die größte die Vermeidung des Verlustes von Helium, sondern die Vermeidung des Zutrittes von Edelgasen aus der Luft. Die erhaltenen Heliumquantitäten betragen im allgemeinen pro 100 g Substanz einige Kubikzentimeter oder auch nur Hundertstel von Kubikzentimetern pro Gramm Uran. Die gleichzeitige Bestimmung des Uran-, resp. Radiumgehaltes nach einer später zu erwähnenden Methode ermöglicht den Vergleich.

Zunächst erhielt Strutt freilich recht unsichere Ergebnisse. Die stratigraphische Folge stimmte nur beiläufig mit dem Ansteigen des Heliumgehaltes. Nur in den größten Zügen und zwischen den extremsten Altersstufen waren die Abänderungen des Heliumgehaltes analog dem geologischen Alter. Es sind offenbar nicht nur Altersunterschiede maßgebend. Die radioaktiven Substanzen sind wahrscheinlich zum Teil durch Fällung aus dem Meerwasser in das Sediment aufgenommen worden. Es bleibt unsicher, wie lange der Prozeß der Anreicherung angedauert hat; er fand vielleicht eine Fortsetzung in diagenetischen und Konzentrationsprozessen und erfolgte vielleicht zugleich mit der Anreicherung von Fluor, welche sich in der Regel in organischen Phosphatbildungen vollzieht. (Joly [17].) Wechselnder Einfluß von Wärme und Druck, besonders in gestörten Schichten, dürften auch den Heliumgehalt nachträglich verändert haben. Die Neubildung von sekundären Uran- und Radiummineralen, welche auf Erzgängen nicht selten ist, läßt auch nachträgliche Zufuhr radioaktiver Stoffe auf wässrigem Wege nicht ausgeschlossen erscheinen. So ist z. B. im Pyromorphit $[(PbCl)Pb_2(PO_4)_2]$ Radium mit Blei ohne Spur von Uran konzentriert. Strutt (Nature 1910, 85, S. 6) begegnete dem Einwurf von Piutti, daß Helium durch selektive Aufnahme aus der Umgebung in den Mineralen angereichert worden wäre. Zirkon und Sphen enthalten mehr Helium als das umgebende Gestein und konnten deshalb von diesem nichts entnehmen.⁶⁾

Da ein Entweichen von Helium als wahrscheinlich angenommen werden kann, werden die erhaltenen Zahlen weit eher als Minimum anzusehen sein, denn als Durchschnittswerte.

Später hat Strutt verschiedene Eisenerze und dann die fast stets radioaktiven Zirkone geeigneter für die Prüfung auf Helium gefunden. Hier kommen obige Bedenken betreffend die wässrige Zufuhr nicht in Betracht und diese wenig spaltbaren Minerale sind allem Anschein nach besser imstande, das entwickelte Helium festzuhalten.⁷⁾

Trotz allem bleibt es gewiß sehr auffallend, daß sehr alte Gesteine ein besonders hohes Verhältnis von He:Ra u. Th. aufweisen. So beträgt das Heliumverhältnis im Sphen aus den jungtertiären Eruptivgebieten vom Lachersee $< 0'015$, dagegen in Zirkonen und Titaniten verschiedener archaischer Gebiete 19—52. Nach diesen Untersuchungen von Strutt beträgt das Minimum des Alters für die ältesten Gesteine 700 Millionen Jahre.⁸⁾

In jüngster Zeit versuchte Strutt (27) noch die jährliche Entwicklung von Helium in Thorianit und Pechblende direkt zu bestimmen. Die Werte, welche er durch diese höchst subtilen Untersuchungen erhielt,

⁶⁾ Neben Uran ist auch die Menge von Thor zu berücksichtigen. Die Unterscheidung beider Substanzen wird durch das verschiedene Abklingen der Emanation ermöglicht.

⁷⁾ Doelter zeigte, daß Verunreinigung die größte Rolle bei Aktivität der Zirkone spielt. Reine Zirkone sind inaktiv. (Mitt. d. min. Ges., Wien 1911).

⁸⁾ Auffallend hohen Heliumgehalt zeigte häufig Beryll (Strutt). Hier dürfte Helium bei der Kristallisation in die feste Lösung aufgenommen worden sein.

stimmen sehr nahe überein mit den Schätzungen der Theorie. Thorianit von Galle wäre demnach mindestens 280 Millionen Jahre alt.

Mit Berufung auf diese jüngsten Ergebnisse stellt er folgende Zahlen zusammen, die seiner Ansicht nach sichere Minimumwerte vorstellen:

Sphärosiderit, v. Rheim. — Oligozän	84 Millionen Jahre
Hämatit, Antrim — Eozän	31 " "
Hämatit, Forest of Dean — Kohlenkalk	151 " "
Sphen, Renfrew, Ontario — Archaisch	710 " "

Wie bereits erwähnt wurde, hat Boltwood (Americ. Journ. of Science 1907, Bd. XXIII) auf Grund zahlreicher älterer Analysen den Nachweis erbracht, daß das Verhältnis von Uran und Blei in Mineralen vom gleichen Fundort konstant ist. Seine Zeitschätzungen haben aber wegen der außerordentlich hohen Ziffern Widerspruch erregt. Er erhält z. B. für den frühkambrischen Granit von Glastonbury (Connecticut) 410 Millionen Jahre; für archaische Gesteine von Norwegen und Ceylon sogar 1700 bis 2200 Millionen Jahre. Die Werte wurden allerdings, wie sich später zeigte, unter Zugrundelegung eines falschen Gradienten erhalten; aber sie sind auch nach neueren Berechnungen ebenso hoch oder noch höher. In erster Linie wurde gegen diese Untersuchungen eingewendet, daß es unsicher bleibt, welcher Bleigehalt schon ursprünglich an Verunreinigung dem Uran zugesellt war (11). Freilich spricht es zugunsten von Boltwoods Berechnungen, wenn auch Uranminerale von verschiedenem chemischen Typus und des gleichen Vorkommens [Uraninit (U,Pb)₂(UO₆)₂ und Mackintoshit (UO₂·3ThO₂·3SiO₂·3H₂O) von Llana, Texas; Uraninit und Thorit (ThSiO₄) von Arendal, Norwegen] in zahlreichen Proben das gleiche Verhältnis von Uran zu Blei aufweisen.

Neuere Untersuchungen von A. Holmes (34) geben allerdings wieder ein anderes Bild. Er untersuchte 17 verschiedene Minerale: Thorit, Zirkon, Arangit, Biotit, Nephelin, Feldspat u. a. aus dem mittel-, oder wahrscheinlicher unterdevonischen Nephelinsyenit des Christianiagesbietes. Das Verhältnis des Bleis zum Uran schwankt hier von 0'041 bis 0'500. Der Bleigehalt erscheint höher in uranarmen Mineralen; in diesen tritt, wie es scheint, der ursprüngliche, bei der Bildung der Minerale eingeschlossene Bleigehalt mehr hervor. Holmes verwirft deshalb die Hälfte der Ergebnisse mit niederstem Urangehalt und findet aus einem Mittel von acht Bestimmungen von Blei zu Uran mit 0'045 die Länge des Zeitraumes seit dem Unterdevon mit 370 Millionen Jahren. Er versucht seine und Boltwoods Bestimmung aus dem Bleigehalt in folgender Tabelle zu ordnen:

	Verhältnis Blei : Uran	Millionen Jahre
Karbon (Uraninit Glastonbury)	0'041	340
Devon	0'045	370
Vorkarbon (Gänge Carolina)	0'050	410
Ober- oder Untersilur (Ordovician)		
Uraninit Branchville (Conn.)	0'053	430

³⁾ Gleditsch (21) und Russel zeigten, daß im Autunit [Ca(UO₂)₂P₂O₈ + 8H₂O] von Guada (Portugal) selbst das Verhältnis von Uran und Radium nicht konstant ist. Es sind klare Kristalle, offenbar sekundäre Bildungen auf Gängen, denen nach dem Verhältnis von Uran zu Radium im einzelnen verschiedenes Alter von 1000 bis 1,000,000 Jahren zukäme. Dem würde auch der äußerst geringe Bleigehalt (0'005%) entsprechen. Gray (20) berechnete aus dem Bleigehalt für portugiesischen Autunit ein Alter von 1,000,000 Jahren. Soddy und Pirret erklären Unregelmäßigkeiten durch die lange Lebensdauer des Joniums.

Vorkambrisch:	Verhältnis Blei:Uran	Millionen Jahre
Schweden (postjätulische Pegmatite) . . . [17 Minerale aus verschiedenen Gegenden erscheinen in zwei Gruppen geordnet.]	{1. 0'125 2. 0'155	1025 1227
Vereinigte Staaten (algonkisch oder postalgonkisch)		
Burnetgranit, Llandeilo (Texas)	0'160	1310
Granit (Texas und Colorado)	0'175	1435
Ceylon (Vorkambrisches Grundgebirge) [Ähnlich dem Fundamental Komplexe von Indien.]		
Thorianit	0'20	1640

Man ersieht klar die Zunahme des Verhältnisses Blei zu Uran mit dem geologischen Alter.

Diese Ziffern sind noch unvergleichlich höher als die durch die Heliumbestimmung gewonnenen. Wären die Bestimmungen korrekt, so wäre die vorkambrische Zeit weit länger gewesen, als die Summe aller nachfolgenden Formationen.

Joly, der sich in verschiedenen Studien vielfach mit der Frage nach dem Alter der Erde beschäftigt hat, kritisierte in neuester Zeit Holmes' Ergebnisse (40). Nach Joly's Berechnungen wäre der Kochsalzgehalt der Ozeane in 140 Millionen Jahren angehäuft worden. Zur Erklärung von Holmes' Ziffern aber mußte man annehmen, daß die Flüsse heute ca. 14mal und gewiß nicht weniger als neunmal soviel Kochsalzlösung zum Meere führen, als in der frühen Vergangenheit und daß die Sedimentation unglaublich langsam, etwa mit einem Betrage von einem Fuß in 4000 Jahren, vor sich gegangen wäre. Joly's Vermutung aber, daß sich in einer frühen Entwicklungsperiode der Erde der Zerfall des Urans langsamer vollzogen habe als heute, ist wohl nicht gerechtfertigt. Denn die Berechnungen des Erdalters auf Grund des Salzgehaltes der Meere und der Mächtigkeit der Sedimente scheinen nicht so fest begründet, um so weitgehende Rückschlüsse auf grundlegende physikalische Fragen zu gestatten.

In anderer Weise verwerteten H. Schlundt und R. B. Moore die Radioaktivität zur Zeitschätzung (The radioactivity of the Thermal waters of the Yellowstone National Park Un. Stat. Geological Survey Bulletin 1909, S. 395.) Sie vergleichen rezenten Travertin der Mammoth Hot Springs und der Maine Terrace des Yellowstone Park mit den gleichartigen, von Glazialblöcken überlagerten Absätzen des Terrace Mountain im gleichen Gebiete. Die Aktivität der letzteren betrug nur 1% jener der gegenwärtigen Absätze. Aus dem Verlauf der Abtönung ergibt sich ein Alter von 20.000 Jahren seit der Vergletscherung.

Gewiß sind diese Zeitschätzungen nur sehr unsichere, tastende Versuche. Immerhin erhält man wenigstens in groben Zügen vergleichbare Resultate. Vor älteren Versuchen der geologischen Zeitbestimmung, wie die Berechnungen der Erhaltungsdauer nach dem Wärmegefälle und der Leitungsfähigkeit der Erdkruste, nach dem Salzgehalte des Meeres und nach der Mächtigkeit der Sedimente, haben diese neueren Methoden den Vorzug, daß es sich hier nicht um eine einzige Summenschätzung handelt, sondern daß jede einzelne Bestimmung für sich allein steht; daß gewisse Zeitmomente in der geologischen Vergangenheit herausgegriffen werden, daß die Proben in beliebiger Zahl vorgenommen werden können, daß ferner die Ergebnisse durch geologische und stratigraphische Wahrscheinlichkeitsgründe kontrolliert und nach dem unzweifelhaft bestimmten relativen Alter der Schichten der eventuelle Fortschritt der Methoden geprüft und erkannt werden kann.

Immerhin erhält man schon jetzt den Eindruck, daß man sich an höhere Ziffern wird gewöhnen müssen, als die bisherigen Schätzungen, als die 30 Millionen Jahre die Sollas¹⁰⁾ der Erde gibt nach dem Salzgehalte, die 45 Millionen Jahre, die nach G. H. Darwin seit der Abtrennung des Mondes verlossen sind und die 100 Millionen Jahre, welche Joly aus der Mächtigkeit der Sedimente berechnen will. Becker schließt allerdings mit Berücksichtigung der Wärmeentwicklung aus dem Radiumgehalte der oberen Teile der Erdkruste auf ein Alter des Planeten von nur 50 bis 80 Millionen Jahren. (22.)

II. **Mineralfärbung durch radioaktive Strahlung.** Die Ergebnisse zahlreicher Versuche betreffend Farbenwirkung der radioaktiven Strahlung an verschiedenen Mineralen und Gläsern hat Doelter zusammengestellt (26). Das schwierige Thema der diluten Färbung vieler Minerale wird hiedurch in vielen Punkten geklärt. Amethyst, Rosenquarz, Saphir und zahlreiche Edelsteine verdanken ihre charakteristischen Farbentöne solchen Einflüssen. Viele Minerale die beim Erhitzen ihre Farbe verlieren, wie z. B. brauner und roter Zirkon, Rauchquarz, Amethyst, Turmalin und Topas, können sie durch Radiumbestrahlung wieder erhalten. Man erkennt hieraus mit Sicherheit, daß die Färbung nicht auf einer Eigenschaft der Mineralsubstanz, sondern auf einer fremden Beimengung beruht. Vor kurzem hat Professor Doelter (Mitteilungen d. Wiener Mineralog. Ges. 1911) auch die Ansicht ausgesprochen, daß das vielumstrittene blaue Steinsalz seine Farbe durch die β -Strahlung des Kaliums erhalten habe. Die Blaufärbung kommt am jüngeren Steinsalz nicht vor und scheint sich im Laufe geologischer Zeiträume zu summieren.

Zu den radioaktiven Farbwirkungen gehören auch, wie Mügge (14) erkannte, die sogenannten pleochroitischen Höfe, welche so häufig im Biotit, Cordierit oder Hornblende, meist um kleine Einschlüsse von Zirkon, seltener an Titanit und Erzen, angetroffen werden. Mügge konnte sie an verschiedenen Mineralien in Dünnschliffpräparaten durch kleine Körnchen von Radiumbromid künstlich erzeugen. Die Färbung wird durch die α -Strahlung aus Th- und Ra-haltigen Verunreinigungen des Zirkons hervorgerufen. Er vermutete schon in hochentwickelten pleochroitischen Höfchen ein Merkmal hohen geologischen Alters. Joly und Fletcher (24) haben die Erscheinungen noch eingehender verfolgt. Die Reichweite der α -Strahlen kann aus den bekannten Daten für die Luft nach einer modifizierten Anwendung der Bragg'schen Regel mit Hilfe der Molekularformel und des Molekulargewichtes des Mutterminerals (Biotit, Cordierit) für dieses Mittel berechnet werden. In unausgereiften Höfchen (Zinwaldit aus Gneisen) kann man oft eine innere kleinere „Pupille“ und eine äußere „Corona“ beobachten. Eine ringförmige Zeichnung erklärt sich durch den gesteigerten Effekt der α -Strahlen am Ende ihrer Bahn und eine Gruppe von Ringen aus der verschiedenen Reichweite der α -Strahlen einzelner Zerfallsprodukte. Joly und Fletcher unterscheiden auf diese Weise insbesondere die innere Pupille, bewirkt durch RaA (Reichweite 0.02 mm in Biotit) und den äußeren Hof RaC (0.04 mm), ferner die Strahlung von ThC und ThX. In einem ausgereiften Höfchen verschwinden die Ringe und es entsteht ein intensiv pleochroitischer homogener runder Fleck.

Es läßt sich berechnen, daß die Menge der radioaktiven Substanz in den mikroskopischen Zirkonen in vielen Fällen nur wenige Millionstel Prozent betragen kann, so daß nur etwa ein α -Partikel per Jahr abgegeben werden mag. Es sind Jahrmillionen notwendig, um die Erscheinung bis zur auffallenden Deutlichkeit zu summieren. In der Tat beobachtet man nach Joly und Fletcher in den Glimmern tertiärer Andesite, trotz häufiger Zirkoneinschlüsse, keine pleochroite Höfe; im Cima d'Asta-Granit, welcher der Triasformation angehört, sind sie nach Trener spärlich und unvollkommen entwickelt; in den archaischen Graniten und Schiefen sind die dunklen voll ausgereiften Flecken ganz allgemein verbreitet.

¹⁰⁾ The age of the earth, London.

Die Radiumfärbungen werden vielleicht manche Hinweise auf geologisch-genetische Beziehungen liefern können. Man wird z. B. bei gelbem Saphir auf einen früheren Einfluß von Radiumemanation durch aktive Minerale oder Quellen schließen können und ähnliches wird vielleicht für Rauchquarz und gelben Topas, violetten Flußspat u. a. gelten. (Doelter [26].) Zur Verwertung für die Zeitschätzung sind die Anhaltspunkte aber jedenfalls zu unbestimmt.

III. Rolle der radioaktiven Stoffe im Energiehaushalte des Erdinnern. Von größter Bedeutung für theoretisch-geologische Betrachtungen sind die Erfahrungen über die allgemeine Verbreitung radioaktiver Substanzen in der Erdkruste. Thomson (1902) fand zuerst radioaktive Emanation im Leitungswasser von Cambridge; bald nachher (1903) haben Eister und Geitel die Emanation im Erdboden, insbesondere in Höhlen nachgewiesen und den aktiven Niederschlag aus der Atmosphäre gesondert. Zahlreiche spätere Beobachtungen vieler Forscher haben die allgemeine Verbreitung radioaktiver Stoffe in Wasser, Luft und Erde darzulegen. Für den Geologen sind in erster Linie die Gesteine maßgebend, über welche wir die ältesten und jüngsten und ausführlichsten Daten Hon. R. J. Strutt (South-Kensington London) (2) verdanken. Eve, Joly, Gockel u. a. haben, wie erwähnt, die Arbeiten weitergeführt.

Die Mengen sind allerdings äußerst gering; die Größenordnung, mit der man rechnet, sind Billionstel; schwankend von Bruchteilen bis zum fünfzigfachen.

Es mag als bekannt vorausgesetzt werden, daß die subtilen Messungsmethoden auf der Eigenschaft der radioaktiven Strahlen beruhen, die Luft für den elektrischen Strom leitend zu machen. Eine Eigenschaft, die durch die Annahme gedeutet wird, daß jedes einzelne der losgeschleuderten α -Teilchen (Funken) imstande ist, Millionen von Molekülen zu zertrümmern, bzw. elektrisch negative Elektronen loszulösen von positiven Molekülteilchen. (Man berechnet $3,4 \cdot 10^{10}$ α -Teilchen pro Sekunde und Gramm Radium.)

Mme. Curie verwendete zuerst das Elektroskop zu diesen Messungen. An dem Abfall der Goldblättchen wird die Entladung eines elektrischen Feldes durch die erzeugten Ionen abgelesen.

Auf diese Weise kann selbst die Anwesenheit eines einzigen Ions pro Kubikzentimeter Luft angezeigt werden. Die Empfindlichkeit dieser Prüfungsmethoden übertrifft um das tausendmillionenfache jede qualitativ-chemische Methode. Im einzelnen wurden die Untersuchungen von verschiedenen Forschern mannigfach modifiziert. Joly und Strutt lösen die Substanz und führen die Emanation in das Untersuchungsgefäß über. Thorium- und Radiumemanation werden durch die Abklingungszeit unterschieden. Gockel (38) maß in neuerer Zeit die α -Strahlung des Gesteinspulvers.

Nach den vorliegenden Messungen ließen sich bereits ausgedehnte Tabellen zusammenstellen; hier sind zunächst nur die Durchschnittswerte von Interesse, um welche sich im allgemeinen, wenn auch unbestimmt schwankend, die Ziffern für gewisse Gesteinsgruppen scharen. Die nicht seltenen, oft großen Abweichungen vom Durchschnitt werden zu erklären sein, wenn die mineralogische und chemische Analyse in höherem Maße bei diesen Studien mit in Betracht gezogen wird als bisher.

Einige von Jolys Ziffern seien hier als Beispiele angeführt:

Durchschnitt einiger Granite aus England	$4,1 \times 10^{-12}$ g Radium pro Gramm
Durchschnitt von 12 Analysen jungvulkanischer Gesteine	$7,1 \times 10^{-12}$ „ „ „
(darunter Extreme: Lava v. Vesuv 1855	$19,2 \times 10^{-12}$ „ „ „
Bombe von Martinique 1902 ver-	
(wittert)	$2,0 \times 10^{-12}$ „ „ „ ¹¹⁾

¹¹⁾ Ein auffallender Widerspruch herrscht zwischen den Durchschnittswerten für Basalte bei Joly (17) und bei Strutt (Proceed. Royal. Soc. [34], 1910, S. 378). Ersterer gibt an 4,9, dieser 0,6. Die zweite Ziffer stimmt weit besser mit den Werten für andere basische Eruptivgesteine.

Der Radiumgehalt der Sedimente ist zwar ebenfalls großen Schwankungen unterworfen, im allgemeinen aber geringer als jener der Eruptivgesteine.

Joly gab als beiläufige Durchschnittsziffer für diese 6'2, für jene 4'7. Gockel findet den Gegensatz noch größer; manche saure Eruptivgesteine, insbesondere Aplit und Pegmatite außerordentlich hoch, z. B. Aplit von Sumatra 20×10^{-12} g Radium pro Gramm¹²⁾ Besonders auffallend ist ein Syenitporphyr aus den Vogesen mit $6'7 \times 10^{-12}$ g Ra.¹³⁾

Ohne Zweifel spielen hier Begleitminerale und akzessorische Bestandteile, wie Zirkon, Titanit u. a. als Träger der Radioaktivität eine große Rolle.

Im übrigen sind, wie leicht begreiflich, die Minerale der pleochroitischen Höfe höher aktiv als der Gesteinsdurchschnitt, wie Biotit, Cordierit, Hornblende, Turmalin, auch Orthit und Epidot.

Zu diesen Silikatmineralien gesellt sich noch Apatit; hier scheint, wie in den anderen Phosphaten, Monazit und Xenotim, hauptsächlich Thor, der Träger der Aktivität zu sein. (Mennel [11].)

Tonige Sandsteine und tonreiche Schiefer verhalten sich wie die Eruptivgesteine (Mittel 4'4). Kalkige Sedimente sind im allgemeinen ärmer an Radium. Ebenso reiner Quarzsand der arabischen Wüste mit nur 0'4. (Vgl. auch die neueren Messungen von Buchner [36].)

Ebenso fehlt die Aktivität fast vollkommen den chemischen Sedimenten (Gips, Steinsalz) und wurde in Steinkohle nicht nachgewiesen (v. d. Borne). Dagegen verdient die hohe Aktivität verschiedener von der Challenger Expedition gesammelten Tiefseesedimente, bei den großen Verbreitungen dieser Bildungen, besondere Beachtung. Es ergaben (Joly [17], S. 62):

Globigerinenschlamm	$\left\{ \begin{array}{l} 6'7 \\ 7'4 \end{array} \right\} \times 10^{-12}$ g Radium pro Gramm
Radiolarienschlamm	$\left\{ \begin{array}{l} 15'4 \\ 52'6 \end{array} \right\} \times 10^{-12}$ „ „ „ „
Roter Tiefseeton	$\left\{ \begin{array}{l} 22'8 \\ 50'3 \end{array} \right\} \times 10^{-12}$ „ „ „ „

Nach Gockel (38) wird der Radiumgehalt durch Verwitterung nicht verändert.

Es liegen bisher nur wenige Bestimmungen vor über Thoriumgehalt von Gesteinen. Er scheint etwa tausendmal höher zu sein als der Radiumgehalt.¹⁴⁾ Aber wegen der millionenfach geringeren Aktivität kommt er bei den Wärmeschätzungen nicht wesentlich in Betracht.

Der Durchschnitt in Sedimenten verschiedener Art beträgt nach Joly (19) $1'16 \times 10^{-5}$ und ist im Leinster Granit nur äußerst im Vergleich zum Radiumgehalt sehr gering, nur wenig wirksam und oft kaum nachweisbar (31).

In allerjüngster Zeit veröffentlichte Joly (39) eine neue Methode der Radiumbestimmung in Gesteinen. Die Emanation wird nicht aus den beiden Lösungen, einer sauren und einer basischen ausgetrieben, sondern aus der Schmelze des Gesteinspulvers mit einem Gemenge von Natrium- und Kalium-

¹²⁾ Konstante Verhältnisse fand Fletcher in verschiedenen kristallinen Gesteinen der Antarktis (32).

¹³⁾ Umgerechnet auf die Wertangaben nach der Methode von Strutt und Joly.

¹⁴⁾ Auffallend geringe Werte für Radium und Thorium fand Fletcher (Phil. Mag., Bd. XX, S. 36) an vulkanischen Gesteinen des Andentunnels in Argentinien.

Radium-Mittel	$0'79 \times 10^{-12}$
Thorium-Mittel	$0'56 \times 10^{-5}$

Er will hieraus die relativ geringen Temperaturen in diesem Tunnel erklären.

karbonat aufgeschlossen. Dieses einfachere, raschere und billigere Verfahren ergibt wesentlich höhere Werte des Radiumgehaltes und wird, wenn neue Serien von Bestimmungen vorliegen, die Basis der Berechnungen wohl verschieben. Aber die Grundlage des theoretischen Aufbaues, auf deren Darlegung es hier zunächst ankommen soll, wird dadurch kaum verändert werden.

Curie und Laborde und später Rutherford und Barnes bestimmten die Wärmeentwicklung von 1 g Radium per Stunde mit 110 bis 120 g Kal., d. i. per Sekunde 5.6×10^{-2} g Kal. Der von der Erde ständig abfließende Wärmestrom ist leicht zu berechnen, sobald das Wärmegefälle (geothermische Tiefenstufe) und die Leitfähigkeit der Gesteine bekannt ist. Die beiden Grundfaktoren werden von verschiedenen Forschern nicht gleich angenommen, demgemäß schwankt die Berechnung.

Joly setzt 32 m für die geothermische Tiefenstufe und 0'004 (Kalorien per Zentimeter, Gramm und Sekunde) für die Leitfähigkeit aus dem Durchschnitt zahlreicher Messungen. Er erhält hieraus einen Wärmeabfluß per Sekunde von 1.25×10^{-6} Kal., oder einen jährlichen Abfluß von 2.0×10^{20} Kal. auf der gesamten Erdoberfläche. Rutherford und Rudzki z. B. setzen etwas höhere Werte und erhalten 2.6×10^{20} Kal. für den jährlichen Wärmestrom. Dieses sind unwesentliche Unterschiede für die Betrachtung im Großen.

Nach Rutherford würden 4.6×10^{-14} g Radium per Gramm Erdsubstanz genügen, um den Wärmestrom zu speisen. Zufolge obiger Ziffern beträgt der durchschnittliche Radiumgehalt der bekannten Gesteine etwa 5×10^{-12} und übertrifft somit weitaus die geforderten Mengen.

Diese Ziffern waren der Ausgangspunkt für die weitestgehenden Spekulationen über das Erdinnere; und schon wurde geschlossen, daß die Wärme aller Weltkörper von radioaktiven Substanzen herrühre und das ganze Weltall durch den atomistischen Zerfall geheizt würde. (Soddy.)

Joly gibt jedoch an, daß die Sonne zu 60% aus Uran bestehen müßte, um auf ihre gegenwärtige Temperatur gebracht zu werden: gewiß eine unmögliche Voraussetzung, zumal die radioaktiven Elemente bisher im Sonnenspektrum noch nicht nachgewiesen wurden. Es muß der größte Teil der Energie dort auf andere Weise aufgestapelt worden sein und dasselbe mag auch für die Erde gelten.

Der Anteil des Radiums an der Erdwärme wird verschieden berechnet; freilich lassen sich gewisse Willkürlichkeiten bei der Grundannahme solcher Rechnungen nicht vermeiden. Joly nimmt eine ursprüngliche Erwärmung der Erde auf 1500° (Temperatur über dem Schmelzpunkt der Laven) an und berechnet bei einer spezifischen Wärme der Masse von 0.2 die jährliche Abgabe mit 1.8×10^{20} Kal. Wenn der Gesamtabfluß 2.6×10^{20} beträgt, so entfallen 0.8×10^{20} Kal. auf die Erwärmung durch radioaktive Strahlung. Becker hingegen (22) will mit Anlehnung an die Vorstellung Kelwins von der geringen Leitungsfähigkeit des Erdinnern, nach welcher jenseits einer Schale von 80 Meilen auch nach einem Zeitraume von tausend Millionen Jahren keine Wärme bis außen gelangt, der radioaktiven Wirkung nur ein Zehntel des Wärmeaustausches der Erde zugestehen.

Wie dem auch sei, für uns ist es wichtig, daß die Wärmeezeugung des Radiums der Erde dazu dienen kann, die Widersprüche auszugleichen zwischen Kelwins Berechnung des Erdalters aus der Erkaltung auf 30 bis 40 Millionen Jahre mit allgemeinen geologischen Vorstellungen, welche größere Zeiträume verlangen.

Alle Forscher, die sich mit dem Gegenstande eingehender beschäftigt haben, zuerst Rutherford, dann Elster und Geitel, Strutt, Eve, Joly, Becker, Wolf u. a. stimmen darin überein, daß die Radiummenge nicht in gleicher Weise durch die ganze Erde verteilt sein kann und daß das Erdinnere frei oder fast frei sein muß von radioaktiven Stoffen, oder daß deren Wirksamkeit aufgehoben sein muß. Nur die Schätzungen der radioaktiven Außenschicht weichen voneinander ab je nach der Durchschnittskonzentration, welche für die äußeren Ge-

steinsmassen angenommen wird. Sie schwanken zwischen 22 und 300 km. Wolff nimmt 108 km als wahrscheinlichste Dicke der radioaktiven Schicht; Becker schätzt sie auf 137 km.

In kühnen Folgerungen über den geologischen Effekt radioaktiver Vorgänge ist wohl Joly (17) am weitesten gegangen. Es sei versucht, seine auf den verschiedenartigsten Berechnungen und Ueberlegungen beruhenden Gedankengänge in skizzenhaftem Umriß wiederzugeben. In Gebieten mächtiger Sedimentanhäufung findet eine Verdickung der relativ wenig mächtigen radiumreichen Schichte statt, es wird das Abströmen der Wärme aus der Erdkruste verzögert. Die Sedimente sind im allgemeinen schlechtere Wärmeleiter als die Eruptivgesteine und die Geoisothermen steigen mit dem Quadrate der Ueberdeckung empor. Die Basistemperatur eines radioaktiven Lagers steigt mit dem Quadrat seiner Dicke.

Mit der zunehmenden Belastung geht zunächst ein Sinken des Ozean-Untergrundes Hand in Hand. So erklären sich die außerordentlichen Mächtigkeiten von in relativ seichtem Wasser gebildeten Ablagerungen (Animikie, Keweenaw, paläozoische Sedimente der Appalachen, Mesozoikum der Tethys usw.) Die Anhäufung von 14 km Sedimenten hätte nach Jolys Rechnungen das Aufsteigen der Geoisotherme von 800° aus 40 km Tiefe bis auf 218 km zur Folge. Wenn man annimmt, daß 800° die Temperatur der Erweichung für die Gesteine darstellt, so würde in einer Zone so mächtiger Sedimentanhäufung der Widerstand der Erdkruste gegen Tangentialdruck um fast 50% vermindert. Die Effekte summieren sich allmählich im Laufe geologischer Zeiträume. Es entstehen an den Rändern der Kontinente inniger durchwärmte Zonen, zugleich Zonen geringeren Widerstandes gegen den tangentialen Spannungsdruck.

Diese Ergebnisse müßten in den Hauptzügen gleich bleiben, auch wenn die ziffermäßigen Angaben ziemlich beträchtlichen Aenderungen unterworfen sein sollten. Auf eine langwährende Periode der Aufschüttung folgt, einmal ausgelöst, eine Periode des Zusammenschubes und des Aufstaaes. Die Sedimente geben dem Spannungsdrucke nach; sie können nur nach oben ausweichen und wölben sich zu Antiklinalen empor, später sich seitlich überstürzend. Durch tangentiale Ueberschiebung wird die Dicke der Kruste noch erhöht, das Heraufrücken der Geoisothermen noch gefördert. Die Erwärmung in der Tiefe erzeugt Umkristallisation mit den Merkmalen des „Gesteinsfließens“ (rock floage), wie sie den kristallinischen Schiefiern eigen sind; vielleicht auch örtliche Aufschmelzung.

So soll sich die große Mächtigkeit der Sedimente in den Kettengebirgen, deren Lage am Rande der Kontinentalmassen und die Einengung der Tethys erklären.

Der Grund der Ozeane aber bleibt stabil, trotz hoher Aktivität der Tiefseesedimente, denn dort geht der Absatz außerordentlich langsam vor sich und große Mächtigkeiten werden niemals erreicht.

Man erkennt leicht, daß der Hypothese größtenteils die gleichen Beobachtungstatsachen zugrunde gelegt sind, wie der Theorie der Geosynklinalen von Marcell Bertrand und Haug. Doch wird hier das Ansteigen der Gebirge nicht aus Synklinalen, sondern von den Rändern der Kontinente angenommen.

So anregend und beziehungsreich auch Jolys Ausführungen sind, so stimmt doch das allgemeine Bewegungsbild nicht mit den Vorstellungen von dem Mechanismus der Erscheinung. Die Einheitlichkeit der großen Konvexbögen, die sich in den Scharungen gewöhnlich zu besonderen Höhen emporstauen, die Art des Zusammenhanges der jungen Ketten mit älteren Strukturen, die Stauungen an alten Massen, das Fortstreichen der pazifischen Ketten, weit in den Ozean hinaus, während junge Ketten den Rändern des atlantischen Ozeans vollkommen fehlen, lassen sich nicht mit der Vorstellung einer besonderen, an die Ränder der Ozeane gebundenen Disposition zur Gebirgsbildung vereinigen.

Andererseits kennt man auch sehr mächtige Sedimentmassen, z. B. im Keweenawan, welche seit den ältesten Zeiten keine Veranlassung zu bedeutenderen Gebirgsbewegungen gegeben haben.

Ebenso wie bei einer Diskussion der Geosynklinalentheorie wird man auch hier in Erwägung ziehen, ob nicht vielmehr die absinkenden Vortiefen, die tangential Bewegung zur Auslösung brachten, den Anlaß gaben zur mächtigen Anhäufung der Sedimente und diese dann von dem weiteren Vorschub überwältigt wurden.

Major Dutton war der erste, der bereits 1906 (1) versuchte, den gesamten Vulkanismus der Erde auf radioaktive Vorgänge zurückzuführen; örtliche, außerordentliche radioaktive Erwärmung verursacht, nach seiner Ansicht, Durchschmelzung relativ kleiner Gesteinsmassen in der Nähe der Oberfläche, welche sich mit Hilfe der Expansion des Wasserdampfes ihren Weg nach oben bahnen.

Louderback trat ihm bald entgegen (3) und zeigte, daß man nach Duttons Annahme häufiger eine den Sedimenten näherstehende Zusammensetzung der Laven zu erwarten hätte und nicht die stets wohldefinierten chemischen Charaktere, welche allen Eruptivgesteinen zukommen. Die Laven müßten unter der Zone der Sedimente ihren Ursprung haben. Mannigfache basische Laven durchbrechen oft und in großer Zahl alte granitische Gebirge und können nicht durch Aufschmelzung der letzteren entstanden sein. Nach seiner Ansicht mag Radioaktivität den größten Teil oder vielleicht den ganzen Betrag der inneren Erdwärme liefern; die Verteilung der Vulkane aber, der wechselnde Rhythmus und die oft lange Dauer ihrer Tätigkeit, ihre Unabhängigkeit von der Radioaktivität der umgebenden Gesteine und der Temperatur der Laven von dem Radiumgehalt, vor allem aber die Verteilung der tätigen Vulkane lassen erkennen, daß die Vulkane nicht abhängig sind von der örtlichen Beschaffenheit der Erdkruste, sondern eine Begleiterscheinung der diastrophischen Vorgänge an den großen Störungszonen, welche den Planeten umfassen.

F. v. Wolff, Danzig (9), hat auf anderem Wege wie Dutton eine Theorie des Vulkanismus unter Einfluß der Wärmeverteilung in der radioaktiven Schale entwickelt; er folgte hiebei zunächst den Anschauungen von Stübel und Branca, nach denen die Eruptionen aus einer Energie erzeugenden Kraft, welche im Magma selbst enthalten ist, zu erklären wären. Stübels Annahme, daß eine molekulare Ausdehnung der Laven in der Nähe der Oberfläche während des Erkaltes in der flüssigen Phase oder bei der Kristallisation stattfindet, wird jedoch abgelehnt. Dagegen verweist v. Wolff auf die Untersuchungen Tamanns über Kristallisationen unter hohem Drucke, welche ergeben haben, daß bei Stoffen, welche unter Kontraktion kristallisieren, bei zunehmendem Drucke eine Verschiebung des Schmelzpunktes im positiven Sinne stattfindet bis zu einem maximalen Schmelzpunkt. Bei weiterer Steigerung des Druckes ist unter Sinken des Schmelzpunktes die kristallinische Erstarrung von Volumvermehrung begleitet. Aus den Schmelzpunktverschiebungen von Feldspat und Augit, bei relativ geringen Druckveränderungen nach den Versuchen von Vogt, schließt v. Wolff auf den mutmaßlichen weiteren Verlauf der Schmelzkurve von Silikaten. Der maximale Schmelzpunkt wird mit Vogt in etwa 150 km Tiefe bei zirka 40.000 Atm. Druck angenommen.

Nur jenseits dieser Tiefen kann Kristallisation der Silikate unter Volumvermehrung stattfinden und kann unter stetiger Ansammlung von Spannkraft anwachsender Druck erzeugt werden. Bei gleichmäßiger Zunahme der Temperatur nach der Tiefenstufe von 33 m würde der Schmelzpunkt der Gesteine schon bei geringeren Drucken in 40 km erreicht werden. Das Wärmegefälle entspricht nicht einem einfachen gleichmäßigen Abkühlungsvorgange, sondern wird noch von anderen Faktoren beeinflusst.

Nach Königsberger (4) sollte man wegen der Abnahme der Wärmeleitung der Gesteine bei zunehmender Temperatur eine Zunahme des Gradienten erwarten. Da aber bis zur bekannten Tiefe von 2 km der Gradient eher zu- als abnimmt, schließt Königsberger und mit ihm

v. Wolff, daß zur Erklärung der Erdwärme noch andere Prozesse herangezogen werden müssen.

Da, wie hier auch rechnerisch ausgeführt wird, der Radiumgehalt an der Erdoberfläche größer ist als die zur Herstellung des Gleichgewichtes notwendige Menge, muß geschlossen werden, daß die Radioaktivität auf eine äußere Schale beschränkt ist, deren Mächtigkeit je nach dem angenommenen Durchschnittswerte in den Gesteinen zwischen 20 und 300 km schwanken mag.

Wolff ist nicht der Ansicht, daß die radioaktiven Stoffe in ihrer Verbreitung auf eine oberflächliche Stelle der Erde beschränkt sind, sondern vertritt die Hypothese, daß bei dem hohen Druck im Erdinnern der Bau der komplizierten, schweren Elemente stabil bleibt und ihre Aktivität nur ausgelöst wird, wenn sie in die Nähe der Erdoberfläche, in Gebiete geringeren Druckes gelangen. Der inaktive Kern würde demnach bis zur Stabilitätsgrenze in einem Druckgebiete zwischen 6.000 und 80.000 Atmosphären hinabreichen.

Ferner glaubt Wolff in großen periodischen Zyklen des Vulkanismus und der Gebirgsbildung das Anzeichen einer Abnahme der Energie zu erkennen, und findet in der Zunahme der Dauer der Vereisungen eine allmähliche Erkaltung des Planeten. Er schließt hieraus, daß durch die Radiumstrahlung noch kein stationäres Gleichgewicht im Wärmehaushalt der Erde erreicht ist; doch zweifelt er nicht, daß Radiumstrahlung in der Nähe der Oberfläche die Abkühlung außerordentlich verzögert und die Hauptmenge der von der Erde abfließenden Wärme liefert.

Die Ausführungen Wolffs gipfeln aber in einer theoretischen Spekulation über die Beziehung zwischen dem Verlauf der Wärmezunahme und der Verschiebung des Schmelzpunktes der Gesteine bei Zunahme von Temperatur und Druck gegen die Tiefe. Eine Tabelle, auf welcher die hypothetischen Kurven eingetragen sind, soll diese Beziehungen erläutern.

Der Gradient muß mit wachsender Tiefe abnehmen, bis er Null wird an der Grenze der radioaktiven Schichten. Ihre Mächtigkeit ist bestimmt durch den Durchschnittswert des Radiumgehaltes in der Nähe der Oberfläche und mit ihr wächst die Maximaltemperatur in der Tiefe. Drei Fälle mit verschiedenen supponierten Durchschnittswerten werden in Betracht gezogen. Im Falle die Temperaturkurve die Schmelzkurve in ihrem oberen Ast, welcher Erstarrung unter Kontraktion bedeutet, nicht mehr erreicht, muß die Erstarrung der Erdrinde bereits über den maximalen Schmelzpunkt bis in das Gebiet der Kristallisation unter Volumvermehrung vorgeückt sein. Im entgegengesetzten Falle schneidet die Temperaturkurve die Schmelzkurve einmal oberhalb des maximalen Schmelzpunktes. Unter einer relativ dünnen, festen Rinde befände sich der mächtige, anisotrope Kern. Am wahrscheinlichsten ist für Wolff der Fall, in welchem bei einem durchschnittlichen Radiumgehalt der aktiven Schicht von $7,6 \text{ bis } 8 \times 10^{-12} \text{ g}$ im Kubikzentimeter die Schmelzkurve durch die Temperaturkurve in der Nähe der scharfen Biegung der letzteren an der unteren Grenze der radioaktiven Schicht zweimal geschnitten wird. Dies bedeutet, daß sich im Druck- und Temperaturgebiet des maximalen Schmelzpunktes eine flüssige Magmaschicht über einem festen Kern und unter einer festen Hülle befindet. Sie wird in einer Tiefe von etwa 50 km angenommen; ein Wert, welcher mit v. Milne nach der bei Weltbeben auftretenden Periode von 17 bis 18 Sekunden für die Nachschwingungen angenommenen Mächtigkeit der Erdkruste (48 km) gut übereinstimmt.

In diese Tiefe will Wolff die Energieerzeugung durch Kristallisation unter Volumvermehrung und den Sitz der von unten nach außen wirkenden vulkanischen Kraft im Sinne von Naumann und Richthofen verlegen.

V. Verteilung der radioaktiven Stoffe in der Erde. In beträchtlichen Mengen sind radiumführende Uranerze nur auf Gängen angereichert und begleiten in der Regel die sauren Granite. Im Erzgebirge wie in Cornwall wurden sie durch Zinn und Wolfram führende Grauite emporgebracht; sie wurden aber nicht zugleich mit diesen einer pneumatolitischen Epoche

angehörigen Stoffen angereichert, sondern die Hauptvorkommnisse von Uranpecherz stammen aus einer späteren Erkaltpphase der Granitmasse, welcher die zahlreichen Schwermetalle des berühmten Gebietes angehören. Diese waren hauptsächlich an sulfidische Lösungen gebunden, während das in Kohlensäure leicht lösliche Uranerz, als Begleiter der sogenannten Braunspatformation, sowohl in Böhmen wie in Sachsen, ohne Zweifel durch karbonatische Lösungen transportiert und konzentriert wurde. (Stölp und Becke, Das Vorkommen des Uranpecherzes zu St. Joachimsthal. Sitzungsber. d. Akad. d. Wissensch., Wien 1904, Bd. CXIII, S. 585.) Aber auch in anderen Erzformationen, auch auf den zinnführenden Zwitterlagern und auf Gängen edler Quarz- und kiesiger Blei- und Kupferformation, und der barytischen Blei- und Silberformation findet sich Uranglimmer und andere Uranminerale, manchmal in bemerkenswerter Menge, häufiger nur in geringen Spuren. Ja, selbst mikroskopische Einsprengungen von Uranpecherz werden aus der Umgebung von Schneeberg und in weiter Verbreitung aus der Eibenstocker Granitmasse erwähnt. (Schiffner, Uranminerale aus Sachsen. Freiberg i. S. 1911, S. 15.) Es scheint mir wahrscheinlich, daß Uran nicht direkt aus tieferen Teilen der Erde gefördert wurde, sondern ebenso wie die anderen Schwermetalle ursprünglich in der granitischen Schmelze diffus verteilt war und durch die während und nach der Erstarrung abgechiedenen Lösungen emporgebracht und konzentriert wurde.

Das allgemeine geologische Problem der Verteilung der radioaktiven Stoffe bezieht sich jedoch nicht auf solche örtliche Vorkommnisse, die mit anderen Anreicherungen sonst spärlich verteilter Stoffe, z. B. den Vorkommnissen von Th, La, Ce in Brasilien, Norwegen und in den Vereinigten Staaten in Parallele gestellt werden können, sondern auf die Erklärung der Anreicherung der radioaktiven Stoffe in einer äußeren Hülle und deren Fehlen im weitaus größeren Teile des Erdinneren, wie es durch die Physiker aus dem Radiumgehalt der Oberflächengesteine und aus der von der Erde abströmenden Wärmemenge erschlossen wurde.

Die Bestimmungen des Gewichtes der Erde führen bekanntlich zu der Annahme eines schweren Erdkernes unter einer leichteren Hülle. Man sollte erwarten, daß auch die allerschwersten Elemente: Radium, Uran und Thorium, in der Tiefe angesammelt seien. Während die Schwere der Hülle zurückbleibt gegenüber dem Gesamtgewicht des Planeten, übertrifft deren Wärmelieferung durch Radium den berechneten Durchschnitt des gesamten Erdkörpers.

Den Widerspruch mit unserer allgemeinen Vorstellung von der Anordnung der Stoffe nach der Schwere, wie sie zuerst von Daubrée durch die Beziehungen an Meteoriten vorgebracht, später von Wiechert u. a. auf geophysikalischer Grundlage, insbesondere durch die Ergebnisse der physikalischen Erdbebenforschung weiter ausgearbeitet wurden, suchten einzelne Forscher auf verschiedene Weise zu klären. Wie bereits erwähnt wurde, nahm Wolff an, daß die radioaktive Strahlung nur an der Oberfläche unter geringen Drücken zur Auslösung gelange und der Atomzerfall in der Tiefe gehemmt und latent sei. Becker (10) ist der Ansicht, daß eine radioaktive Schale von der Mächtigkeit von 137 km genügt, um das Wärmegefälle der Erde zu erhalten. Er sprach die Ansicht aus, daß Uran erst in der erstarrenden Granitzone, etwa bei Temperaturen von 800° C und einem Drucke von ca. 100 km. gebildet werde. Ein Teil der Erstarrungsenergie würde gleichsam in der endothermen Verbindung PbHe_2 (Uran) aufgestapelt, und beim Zerfall während des Erkaltes unter enormer Wärmeentwicklung wieder frei werden. Die Bildung der radioaktiven Elemente wäre eine Zwischenstufe in der Energieabgabe des erkaltenden Sternes.

Joly glaubte daß Konvektionsströme im flüssigen Erdball die uranreichen und deshalb wärmeren Teile des Magmas zur Erdoberfläche gebracht hätten. Freilich bleibt es hier unerklärt, warum dennoch die Stoffe der Erde im großen nach der Schwere gesondert sind.

Mögen auch durch vollkommenerere Methoden die Einzelwerte der Radiumbestimmung in Gesteinen in der Zukunft Verschiebungen erleiden

(July 39), so bleibt doch als sicheres Ergebnis zahlreicher Messungen die auffallende Tatsache bestehen, daß gerade die sauersten Granite und Pegmatite am meisten radioaktive Emanation ergeben.

Fast scheint es, daß im großen und ganzen die Radioaktivität proportional ist der Kieselsäuremenge. Ebenso verhält sich auch der Radiumgehalt in Meteoriten.

Strutt bestimmte im Steinmeteoriten (Chondrit) von Dhurmsala mit $1'12 \times 10^{-12}$ g Radium pro Gramm.

Mehrere Eisen (Thunda, Augusta, Catarina) ergaben keine Spuren von Radioaktivität.

Es besteht heute kein Zweifel mehr, daß das gediegene Eisen von Ovikaf in Grönland nicht meteorischen Ursprunges ist, sondern aus dem eisenreichen Basalte, sei es durch Differentiation, sei es durch Reduktion während des Durchbruches von Braunkohlenflözen abgeschieden wurde.¹⁵⁾ Auch für dieses Eisen fand Strutt einen sehr niedrigen Wert, nämlich $0'424 \times 10^{-12}$ g Radium pro Gramm Gestein. Aber auch der eisenreiche Basalt von Disko besitzt nach Strutt einen Radiumgehalt von ähnlicher Größenordnung ($0'613 \times 10^{-12}$).

Man wird nach diesen Ziffern annehmen können, daß der innere silikatreie Eisenkern in der Tat auch frei oder fast frei von radioaktiven Substanzen ist. Es scheint, daß die äußerst spärlichen, diffus verteilten Stoffe in der silikatischen Schlacke über dem Eisenkern angereichert wurden. Dies wird in ähnlicher Weise bei zahlreichen anderen seltenen und äußerst spärlichen Stoffen der Fall sein, die sich jedoch dem experimentellen Nachweise entziehen. Sie folgen noch bis zu einem gewissen Grade dem sauersten Schmelzrest, den aplitischen und pegmatitischen Gängen, in denen ja überhaupt eine Anreicherung der im Gesamtmagma spärlich verteilten Stoffe fast als Regel angesehen werden kann. Im Zirkon und Sphen wird Radium zusammen mit Thor und anderen Unreinigkeiten ausgeschieden. (M e n n e l [11], D o e l t e r [29].)

Diese Analogien der Abhängigkeit der Radioaktivität vom Kieselsäuregehalte im großen und im kleinen, an irdischen Gesteinen ebenso wie an Meteoriten, ergänzt die notwendigen Schlüsse auf einen radiumfreien Erdkern und auf sehr gründliche Sonderung der Stoffe in einer flüssigen Phase des Planeten.

Man kann sagen, daß die Erkenntnis einer äußeren radiumreichen Hülle über einem inaktiven Kerne, gemäß unseren Erfahrungen über den Radiumgehalt der Gesteine, zu den bisherigen Argumenten für einen Eisenkern im Innern des Planeten noch ein Neues hinzufügt. Sie ist zugleich ein Argument dafür, daß die Erde einst als Ganzes flüssig gewesen ist und daß, wie es nun wiederholt aus beschränkteren Magmagebieten beschrieben wurde, ursprünglich im großen eine sehr gründliche Sonderung von Schlacken und Kern stattfinden konnte, wie ja auch eine gewisse Sonderung nach der Schwere im ganzen Planetensystem stattgefunden hat. Saturn und Jupiter, befinden sich gegenwärtig noch wenigstens teilweise im flüssigen Zustande und wenn man auch vom gegenwärtigen Zustand der Sonne absehen will, hat sich der Mond, nach G. H. Darwin, einst im flüssigen Zustande von einer äußeren leichteren Hülle der Erde abgetrennt; seine Oberflächengebilde sind als Anzeichen eines von großartigen Eruptionen begleiteten Erstarrungsvorganges zu deuten.

Sir Norman Lockyer verlegte die Bildung neuer Elemente in die Sonne.¹⁶⁾ Der Zerfall des Radiums in die heliumbildende Emanation hat der Vorstellung von dem gemeinsamen Aufbau der Elemente neue Unterstützung und Anregung zu neuerlichen theoretischen Spekulationen gege-

¹⁵⁾ A. Schwantke, Sitzungsab. d. kgl. preuß. Akademie der Wissenschaften. Berlin 1906, Bd. II, S. 853.

¹⁶⁾ Inorganic evolution. London, 1900.

ben¹⁷⁾. Er führte weiterhin zu der Vermutung, daß alle Materie in beständigem Zerfall, in einem fortschreitenden Abbau ihrer Atome unter Energieentwicklung begriffen ist. Auch bei sehr leichten Atomen, beim Kalium und Rubidium, ist Strahlung nachgewiesen, die Umwandlungszeiten mögen aber tausend- oder millionenmal größer sein als die der schwersten und größten Atome.

Das Helium in der Sonne, in Sternen und Nebelflecken mag ebenfalls durch Abscheidung aus größeren Atomen entstanden sein. Manche Forscher wollen insbesondere die Bildung der komplizierten radioaktiven Atome in die Gebiete höchsten Druckes und höchster Temperatur verlegen. Sie werden unbeständig bei irdischen physikalischen Bedingungen und ihr Zerfall ist eine Staffel in dem großen und vielgestaltigen exothermen Prozeß, welcher die Geschichte der Erde und des gesamten Planetensystems umfaßt.

F. Exner schließt aber aus der Gleichheit der chemischen Elemente, durch das ganze sichtbare Weltsystem bis zu den fernsten Sternen und Nebelflecken, daß alle bekannte Materie sich in einer gleichen, temporären Phase befindet, die gleiche Geschichte seit einem unbekanntem Ausgangspunkte hinter sich hat und einer unbekanntem gleichen Zukunft entgegengeht.¹⁸⁾ Nach Wulf¹⁹⁾ z. B. wäre die verschiedene Häufigkeit der Elemente eine Folge ihrer verschiedenen Lebensdauer. Der Umstand, daß zahlreiche Atomgewichte um vier oder ein Multiplum von vier voneinander abstehen, spricht für eine gemeinsame Abstammung und Umwandlungen unter Abscheidung von Helium.

Die Verhältnisse, nach denen radioaktive Stoffe in der Erdkruste verteilt und in sauren Magmen angereichert sind, führen zu der Annahme, daß sie so wie im einzelnen in den lokalen Gesteinsabscheidungen, auch im großen einem Differentiationsvorgange gefolgt sind, daß ihre Entstehung vor die planetarische Phase zu verlegen ist und daß sie dem glutflüssigen Tropfen, in dem sich die Stoffe nach der Schwere gesondert haben, bereits bei seiner Abtrennung von der Sonne einverleibt waren.

Das Größte und Kleinste, Atomzerfall und Aufbau der Welten, wird in dem Gedankengange des Radiumphysikers aneinander geknüpft. Zwischen beiden Enden stehen die Tatsachen der geologischen Forschung.

*

Fortschritte der Tatra- und Karpathentektonik in den letzten Jahren.

Von W. Goetel.

1. M. Limanowski, Odkrycie płatu dolnotatrzańskiego w pasmie Czerwonych Wierchów na Gładkiem. (Sur la découverte d'un lambeau de recouvrement subtritique dans la région hautatritique de Gładkie [monts Tatra]). Extrait du bulletin de l'Académie des sciences de Cracovie, classe de sciences mathém. et naturelles. Cracovie 1904.

2. M. Limanowski, Sur la genèse des Klippes des Carpathes. Bulletin de la société géologique de France. Paris 1906.

3. W. Kuźniar, Versuch einer Tektonik des Flysches nördlich von der Tatra. Bulletin de l'Académie des sciences de Cracovie 1910.

4. M. Limanowski, Czy eocen w Tatrach transgreduje na miejscu, czy został przywleczony zdala. (Le Nummulitique de la Tatra est-il autochtone ou charrié.) Kosmos. Lemberg 1910, Bd. XXXV, S. 719.

¹⁷⁾ Vgl. z. B. N. A. Morosoff, Die Evolution der Materie auf den Himmelskörpern. Vortrag gehalten auf dem I. Mendelejeff-Kongreß St. Petersburg. Th. Steindroff, Dresden, 1910.

¹⁸⁾ Ueber Radiumforschung. Vortr. geh. in der feierl. Sitzg. d. kais. Akad. d. Wiss. Wien, 30. Mai 1910.

¹⁹⁾ Phys. Zeitschr. 1911.