

Werk

Titel: Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radioaktiven Erscheinunge...

Autor: Lawson, Robert W.

Ort: Berlin

Jahr: 1917

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0005|log355

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

über die mikroskopische Struktur der vulkanischen Gesteine, über die Erscheinungen der Eiszeit sowie über Meteoriten und die angeblich darin enthaltenen Organismen. Der ihm sonst ferner liegenden botanischen Paläontologie diente er durch die Übersetzung von *Saportas* Werk über „die Pflanzenwelt vor dem Erscheinen des Menschen“. Überhaupt hielt er es für seine Aufgabe, durch Übersetzungen hervorragender Schriftsteller zwischen der deutschen, französischen und englischen Wissenschaft zu vermitteln. Außer den „*Vestiges*“ und *Saporta* übertrug er *Huxleys* gehaltreiche Schrift „Über unsere Kenntnis von den Ursachen der Erscheinungen in der organischen Natur“ und *Brillat-Savarins* „Physiologie des Geschmacks“ in das Deutsche, *Gegenbaurs* „Grundzüge der vergleichenden Anatomie“ in das Französische. Bedenkt man, daß er neben dieser umfassenden literarischen und rednerischen Betätigung im Dienste der Vermehrung und Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse noch Zeit zur Beteiligung an organisatorischen und politischen Bestrebungen fand, so staunt man über die gewaltige Arbeitsfähigkeit, die dieser Kraftnatur beschieden war.

Viele Jahre lang wirkte *Vogt* für den Gedanken, eine internationale zoologische Meeresstation ins Leben zu rufen, und bahnte damit das *Dohrnsche* Unternehmen an, das er 1883 zu mehrmonatigen Studien besuchte. Er beteiligte sich an der Gründung des Genfer Nationalinstituts für Wissenschaft, Kunst und Agrikultur, half die Deutsche anthropologische Gesellschaft ins Leben rufen und war einer der Tätigsten bei der Errichtung der Genfer medizinischen Fakultät, durch die sich die Akademie zum Range einer Universität erhob. Er war Mitglied des Großen Rates des Kantons Genf, des Eidgenössischen Ständerates sowie des Schweizerischen Nationalrates und nahm an allen politischen, wirtschaftlichen und kulturellen Bewegungen seiner neuen Heimat den regsten Anteil. Die schwierige polizeiliche Regelung der Fischereiverhältnisse in den italienisch-schweizerischen Seen wurde ihm übertragen. Auch bei allen großen Ereignissen der Weltpolitik ließ *Vogt* seine ratende und mahnende Stimme erschallen, und stets fanden seine Schriften über die europäische Lage lebhaften Widerhall bei Freund und Feind. Selbst in dichterische Form kleidete er seine politischen Gedanken, wie er denn überhaupt mehrfach seiner humoristischen und satirischen Laune in poetischen Ergüssen die Zügel schießen ließ.

Ende Juni 1894 begann der Sechundsiebzigjährige auf vielfaches Verlangen seiner Freunde, seine Lebenserinnerungen zu schreiben. Leider gelangte er in diesem, an originellen Charakter schilderungen überreichen Buche nur bis zu seiner Übersiedelung von Neuchâtel nach Paris. Am Sonntag, den 5. Mai 1895, nachmittags 5 Uhr, nahm der Tod dem unermüdeten Arbeiter die Feder aus der Hand.

Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radioaktiven Erscheinungen¹⁾.

Von Robert W. Lawson, derzeit am Institute für Radiumforschung in Wien.

(Schluß.)

V. Das Ansammeln von Blei in radioaktiven Mineralien.

Daß das Blei fast immer in Uranmineralien nachweisbar ist, ist eine den Mineralchemikern schon längst bekannte Tatsache. *Hillebrand* erwähnt, daß ihm kein Fall vorgekommen ist, wo das Blei nicht als Begleitelement des Urans in uranhaltigen Mineralien vorhanden wäre. Auch *Boltwood* hatte dies erkannt, und im Jahre 1905 äußerte er als erster die Vermutung, daß hier ein genetischer Zusammenhang vorliegt. Sollte nicht das Blei als stabiles Endprodukt des Zerfalls im Falle der Uranserie aufzufassen sein? Zwei Jahre später konnte er zeigen, daß in Mineralien desselben Alters das Verhältnis Blei zu Uran merklich konstant ist und daß es mit dem Alter des Minerals zuzunehmen schien. Die Frage wurde dann von *Holmes* 1911 weiter behandelt und aus den Blei-Uran-Verhältnissen eine Methode ausgearbeitet, die mit einiger Sicherheit das Alter der Mineralien zu bestimmen gestattet. Die Ergebnisse der neueren Forschungen auf diesem Gebiete haben die Richtigkeit der Boltwoodschen Auffassung vollauf bewiesen. Freilich fehlen direkte experimentelle Beweise für das Entstehen eines bleiartigen Endproduktes (RaG) der Uranzerfallsreihe, da solche Versuche langjähriges Beobachten benötigen und in einem Menschenalter zu keinem einheitlichen RaG führen können; — das mit dem Blei isotope Element RaD wird naturgemäß stets im entstandenen Blei vorhanden sein.

Betrachten wir zunächst die deduktiven Argumente, die dafür sprechen, daß das Endprodukt RaG als mit dem Blei chemisch identisch (d. h. isoton) anzunehmen ist.

Die Einordnung der Radioelemente in das periodische System, wie sie von *Soddy* und von *Fajans* ausgeführt wurde, führt das Endprodukt der Uranreihe an die Stelle des Systems, an welcher das Blei steht.

Das Schema des radioaktiven Zerfalles führt nach Verlust von acht Heliumatomen vom Uran zum Endprodukt mit dem theoretischen Atomgewicht 206,2 bzw. 206,0, je nachdem das Atomgewicht vom Uran (238,2) oder das vom Radium (226,0) zu diesem Zwecke angewendet wird. Da nun das Atomgewicht des Bleis den Wert 207,2 besitzt, erweckte diese Unstimmigkeit der Atomgewichte einiges Bedenken bezüglich der Annahme, daß das Blei als Endprodukt der Uran-

¹⁾ In einer vor kurzem in dieser Zeitschrift (4, S. 725, 1. Dezember 1916) erschienenen Abhandlung „Über neuere Versuche einer Zeitmessung in der Erdgeschichte“ behandelte Prof. Dr. O. Abel diese Frage vom biologischen Gesichtspunkte aus.

reihe anzusehen wäre. In den letzten Jahren ist aber das Blei, welches sich in uranhaltigen Mineralien befindet, der Gegenstand vielfacher eingehender Untersuchungen gewesen, die zum Resultat geführt haben, daß dieses Blei, obwohl chemisch und spektroskopisch mit dem gewöhnlichen Blei identisch, ein anderes Atomgewicht als letzteres besitzt. Werte des Atomgewichtes, die durchweg zwischen 206,4 und 206,9 liegen, wurden von *Richards* und *Lembert*, *Hönigschmid* und *St. Horowitz* und von *Maurice Curie* erhalten, meist an Blei aus Pechblende verschiedener Provenienz. Die höheren Werte entsprechen Pechblenden sekundären Ursprunges, die infolge ihres in den meisten Fällen gemeinschaftlichen Vorkommens mit Bleiglanz sehr leicht mit dem gewöhnlichen Blei verunreinigt sein könnten. Für das Blei aus reinem Uraninit von Morogoro in Deutsch-Ostafrika einerseits und aus Bröggerit (*Moos*, Norwegen) andererseits erhielten *Hönigschmid* und *St. Horowitz* die Werte 206,05 resp. 206,06. Ihrer primären Natur nach sind beide Mineralien als frei vom Bleiglanz anzusehen und die erhaltenen mit den theoretisch zu erwartenden gut übereinstimmenden Werte sind auch dafür die sicherste Gewähr. Das Vorkommen von praktisch reinem RaG in primären Uranmineralien ist auch neuerdings von *Richards* und *Wadsworth* bestätigt worden. Diese Forscher fanden für das Blei aus Cleveit (Norwegen) den Wert 206,08. Die Atomgewichtsbestimmungen an Blei aus Uranmineralien bilden also eine mächtige Stütze der Annahme, daß das Endprodukt der Uranzerfallsreihe ein mit dem Blei isotopes Element sein muß.

Für frische primäre Uranmineralien von bestimmtem Alter findet man eine nahe Proportionalität zwischen der Menge des enthaltenen Bleis und der Menge des Urans, d. h. für solche Mineralien wird das Blei-Uran-Verhältnis (Pb/U) nahezu konstant gefunden. Bezogen auf ein Gramm Uran im Minerale ist die Menge des durch den radioaktiven Zerfall entstandenen Bleis in gleich alten Mineralien dieselbe, vorausgesetzt, daß seit der Auskristallisation des Minerals Blei weder hinzugeführt noch durch irgendwelche Prozesse entfernt worden ist. Ein weiterer Beweis für die Richtigkeit der Annahme eines stabilen bleiartigen Elements als Endprodukt der Uranreihe besteht im Verhalten des Pb/U-Verhältnisses in Mineralien von verschiedenem Alter. Untersucht man den Blei- sowie den Urangehalt solcher Mineralien, so findet man eine stetige Zunahme des Blei-Uran-Verhältnisses mit dem Alter. Wäre das RaG ein unstabiles Element, dann müßte sich ein radioaktives Gleichgewicht wahrnehmbar machen, in ähnlicher Weise, wie es beim Radium der Fall ist.

Wie schon erwähnt, läßt sich die Umwandlung des Urans symbolisch auf folgende Weise schreiben:

$$\begin{array}{r} \text{U} > 8\text{He} + \text{RaG} \\ 238,2 & \quad 32 \quad 206,0 \end{array}$$

Nun läßt sich aus den Rutherford-Geigerschen Zählungen der

α -Teilchen berechnen, daß 1 g Uran samt Zerfallsprodukten in einem Jahre $11,0 \cdot 10^{-8}$ cm³ oder $1,97 \cdot 10^{-11}$ g Helium entwickeln würde. Diese zeitliche Heliumentwicklung ist auch experimentell von *Strutt* mit befriedigend übereinstimmenden Resultaten direkt gemessen worden. Aus obiger Relation geht hervor, daß für je 32 Gewichtsteile des entstehenden Heliums 206,0 Gewichtsteile des RaG erzeugt werden; daraus berechnet sich leicht die Menge des RaG, welche von 1 g Uran in einem Jahre erzeugt würde, zu $1,27 \cdot 10^{-10}$ g. Es würde also 1 g Uran, wenn seine Menge während der Desintegration durch fortgesetzte Zugabe vom selben Element auf dem Anfangswert erhalten bliebe, in 7900 Millionen Jahren 1 g RaG produzieren. Wenn wir ferner mit *Pb* und mit *U* die Prozentgehalte eines Minerals an Blei bzw. an Uran bezeichnen, so ergibt sich das Alter eines Minerals durch Einsetzen der Gehalte in die Relation $Pb/U \times 7900$ Millionen Jahre¹⁾.

Die vorliegende Methode zur Bestimmung geologischer Zeiten ist mit einigen Voraussetzungen behaftet, die einer näheren Besprechung bedürfen. Falls gewöhnliches Blei als ursprüngliche Verunreinigung eines Minerals vorhanden sein sollte, ist es klar, daß dies eine große Unsicherheit in der Anwendung dieser Methode mit sich bringen würde. Es sei aber erwähnt, daß die gewöhnlichen Mineralien von Eruptivgesteinen einen praktisch zu vernachlässigenden Gehalt an Blei aufweisen. Wählt man zur Untersuchung

¹⁾ Unberücksichtigt in dieser Relation ist der zeitliche Zerfall des Urans. Streng läßt sich diese Korrektur auf folgende Weise durchführen (siehe *St. Meyer* und *E. von Schweidler*, „Radioaktivität“, bei Teubner, 1916, S. 447). Von einer ursprünglichen Zahl N_0 Uranatome zerfällt die Zahl $N_0(1 - e^{-\lambda t})$ während einer Zeit t , d. h. $N_0(1 - e^{-\lambda t})$ Atome des RaG werden in dieser Zeit erzeugt und es bleiben noch $N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ Uranatome unverwandelt. Das Verhältnis der Massen unter Einsetzung der abgerundeten Atomgewichte (238 und 206) ist daher

$$\frac{\text{RaG (Pb)}}{\text{U}} = 0,87 \cdot \frac{N_0(1 - e^{-\lambda t})}{N_0 \cdot e^{-\lambda t}} = 0,87 \cdot (\lambda t + \frac{1}{2} \cdot \lambda^2 t^2 + \dots)$$

Hier bedeutet t das Alter des Minerals in Jahren und λ die Zerfallskonstante des Urans in reziproken Jahren. *Holmes* macht diese Korrektur auf empirischem Wege etwa wie folgt: Die „Zeitmittelwertmenge (U_m)“ des Urans ist für Zeiten bis zu etwa 2000 Millionen Jahren praktisch gleich $\frac{U_0 + U_t}{2}$ zu setzen. Nun ist $U_0 = U_t + 8\text{He} + \text{RaG (Pb)}$, oder dem Gewichte nach ist $U_0 = U_t + 1,16 \cdot \text{Pb}$; daher ist $U_m = \frac{U_0 + U_t}{2} = U_t + 0,58 \cdot \text{Pb}$ und der exaktere Ausdruck $\frac{\text{Pb}}{U_m} \cdot 7900$ Millionen Jahre für das Alter eines Minerals lautet somit $\frac{\text{Pb}}{U_t + 0,58 \text{ Pb}} \times 7900$ Millionen Jahre.

des Alters nur diejenigen Mineralien, die einen viel größeren Urangehalt als die Hauptmasse des Muttergesteines besitzen, so wird das ursprünglich vorhandene Blei ganz zu vernachlässigen sein gegenüber der Menge, die sich infolge des radioaktiven Zerfalles seit dem Entstehen des Minerals gebildet hat. Ferner wird der ursprüngliche Bleigehalt um so weniger ausmachen, je älter das Mineral ist. Leider können wir aber nicht immer sicher sein, daß das Urblei ein zu vernachlässigender Bruchteil des Gesamtleis ist, und da es am wahrscheinlichsten von Mineral zu Mineral einen verschiedenen Betrag ausmachen würde, könnte die Folge eine sehr schlechte Übereinstimmung der einzelnen Blei-Uran-Verhältnisse sein. Dadurch würde diese Methode der Altersbestimmung sehr viel an Zuverlässigkeit einbüßen. Nun besitzt das gewöhnliche Blei, welches in der Form eines Urbleis in Mineralien vorkommen könnte, ein Atomgewicht von 207,2, das also um 1,2 Einheiten höher ist, als das des auf radioaktivem Wege erzeugten RaG (206,0). Diese Tatsache ist der Fingerzeig, der uns auf das Ziel verlässlicher Altersbestimmungen der Minerale hinweist. Erhielt man für das Atomgewicht des im Minerale vorhandenen Bleis den Wert 207,2, so ist bewiesen, daß der Gesamtbleigehalt aus gewöhnlichem Blei als Verunreinigung besteht; dagegen ist durch ein Atomgewicht von etwa 206,0 der radioaktive Ursprung des Bleis festgestellt. Dazwischenliegende Werte für das Atomgewicht deuten auf eine Mischung der zwei Bleigattungen hin. Es sind also die Kennzeichen für das Nichtvorhandensein von ursprünglichem *Plumbum commune* a) die Konstanz der Blei-Uran-Verhältnisse für eine Reihe von frischen, primären Uranmineralien von gleichem geologischen Alter und b) ein Atomgewicht des untersuchten Bleis von der Größe 206,0.

Schon vor Jahren hatte *Boltwood* in Mineralien vermutlich desselben Alters eine auffallende Unabhängigkeit des Blei-Uran-Verhältnisses vom Thoriumgehalt bemerkt, und daraus den Schluß gezogen, daß man nicht das Blei als stabiles Endprodukt der Thoriumzerfallsreihe annehmen kann. Auch in anderen Fällen schien der Bleigehalt eines Minerals nur mit dem Urangehalt im engen Zusammenhang zu stehen und für eine Reihe von Mineralien — darunter auch Thorite — vom Langesundfjord in Norwegen konnte *Holmes* dasselbe konstatieren. Indes schien es nach Einreihung der Radioelemente in das periodische System durch *Soddy* und *Fajans* im Jahre 1913 sowohl wünschenswert wie auch notwendig, diese Frage einer eingehenderen Untersuchung zu unterwerfen. Nach diesem Schema fallen nämlich die Endprodukte der Uran- bzw. der Thoriumreihe der Blei-Gruppe (IVb) zu. *Holmes* und *Lawson* bestimmten daher nicht allein die Uran- resp. Bleigehalte einer Reihe von Mineralien von Südnorwegen, sondern auch ihre Thoriumgehalte. Diese Mineralien schienen geologisch sehr gut definiert

zu sein und dadurch ausgezeichnet, daß das Verhältnis von Thorium zu Uran in den Einzelproben zwischen weiten Grenzen variierte (ca. von 100 : 1 bis 0,1 : 1). Es stellte sich eine auffallende Unabhängigkeit zwischen den Blei- und Thoriumgehalten heraus, welche sich in der Weise äußerte, daß das Pb/U-Verhältnis (mit zwei Ausnahmen) durch die Serie merklich konstant blieb, wogegen das Verhältnis $Pb/(U + 0,4 Th)$ bis auf ein Fünftel seines höchsten Wertes mit Zunahme des Verhältnisses Th/U heruntersank. Falls Thorblei stabil sein sollte und die Mineralien gleich alt wären, hätte das $Pb/(U + 0,4 Th)$ -Verhältnis konstant bleiben müssen. Diese Resultate schienen also deutlich für die Instabilität des Thorbleis (ThE) zu sprechen, und unter Zuhilfenahme von vier Analysen von Thoriten berechneten die genannten Autoren eine Halbierungszeit für ThE von der Größenordnung 10^6 Jahre. Die Atomgewichtsbestimmungen von *Richards* und *Lembert* an Blei aus Galler Thorianit (Ceylon) sprechen scheinbar auch eher dafür als dagegen, daß das Thoriumblei instabil wäre.

Zu einem ganz anderen Resultate führten aber die Atomgewichtsbestimmungen von *Soddy* und Mitarbeitern an Blei aus Ceyloner Thorit (Provinz Sabaragamuwa). Das theoretische Atomgewicht für ThE ist 208,12, und nun fand *Soddy* zuerst den Wert 208,4, dann später nach einer Bestimmung der Dichte den Wert 207,74. Noch später erhielt er nach einem direkten Verfahren den Wert 207,694. Um es Professor *O. Hönigschmid* zu ermöglichen, Atomgewichtsbestimmungen an demselben Thoritblei auszuführen, hatte Professor *F. Soddy* die Freundlichkeit, mir etliche Gramme seines Materials zu überlassen. An diesem Material fand ersterer, als Mittel aus acht Bestimmungen, den Wert $207,77 \pm 0,014$, ein Wert, der das aus Dichtebestimmungen von *Soddy* ermittelte Atomgewicht vollkommen bestätigt. Damit wurde endgültig festgestellt, daß das Thoriumblei als praktisch stabil angesehen werden muß.

Es seien an dieser Stelle einige Bemerkungen über den scheinbaren Widerspruch zwischen den letztgenannten und den vorher erwähnten Resultaten bezüglich des Thorbleis erlaubt. Am naheliegendsten wäre es vielleicht, an der Richtigkeit der Bleianalysen von *Holmes* und *Lawson* Zweifel zu hegen, wie das ja auch inzwischen von anderer Seite geschehen ist. Hierdurch wäre aber keine Erklärung für die auffallende Konstanz der Pb/U-Verhältnisse in der Serie der von diesen Autoren untersuchten Mineralien gegeben, ganz abgesehen von den Resultaten anderer Analytiker, die in ihrer Arbeit zusammengestellt sind und die ebenfalls für die Instabilität des Thorbleis zu sprechen scheinen.

Nach sorgfältiger Prüfung des Beweismaterials ist der Verf. zur Ansicht gekommen, daß der Widerspruch eher in der sekundären Natur der Thoriummineralien seine Aufklärung findet. Obwohl thorreiche Mineralien und namentlich Thorite

meist als sekundäre Minerale aufgefaßt werden, waren viele Geologen der Ansicht, daß die Zeit ihres Entstehens als „paulo-post“ — d. h. kurz nach der Erstarrung des Hauptmagmas anzusehen wäre. Dies mag ja auch, wie es scheint, in manchen Fällen zutreffen; in den meisten und besonders für die Mineralreihe, die von *Holmes* und *Lawson* untersucht wurde, jedoch nicht. Für einen geologisch gut definierten Gesteinskomplex scheinen diejenigen Minerale, welche im Verhältnis zu Uran den größten Thoriumgehalt aufweisen, fast ausnahmslos jünger zu sein, als diejenigen, welche an Thorium ärmer sind⁴⁾.

Wegen der Unsicherheit, mit der die Blei-Uran-Verhältnisse der Thorminerale behaftet sind, würde es am zweckmäßigsten erscheinen, solche Minerale für *allgemeine* Altersbestimmungen gänzlich zu verwerfen. Bis vor kurzem war man geneigt, an eine fast stetige Verunreinigung von Thormineralien durch gewöhnliches Blei zu glauben, indem man annahm, daß sich das Blei mit dem Thorium vergesellschaftet in etwa derselben Weise, wie es Zink und Kadmium tun. Dies dürfte ja auch bei manchen veränderten Mineralien stimmen, scheint aber im allgemeinen eine unnötige Annahme zu sein. Als Beispiel können wir die Thorianite von Ceylon heranziehen (für Analysen vgl. *Holmes*, Geol. Ass., 1915). Die Archäicum-Plattform von Ceylon besteht aus uralten Gneisen, kristallinen Kalksteinen usw., durchdrungen von: a) einer „Charnockit“-Gesteinsserie, b) Pegmatiten, von denen einige Thorit und Thorianit enthalten, und c) von Pyroxenen und verwandten Gesteinsgattungen. Die Blei-Uran-Verhältnisse der Thorianite in den Pegmatitgängen deuten auf zwei verschiedene Alter hin, je nachdem man den Galler- (mit ca. 20 % Uran) oder den Sabaragamuwa-Thorianit (mit ca. 10 % Uran) zu diesem Zwecke verwendet. Dies ist sicherlich auf das Vorhandensein eines stabilen Thoriumbleis und nicht auf das eines Urbleis zurückzuführen, da sich unter Heranziehung der Resultate, welche mit dem Ceyloner Thorit erhalten worden sind, mit einiger Wahrscheinlichkeit schließen läßt, daß die thorianithaltigen Pegmatitgänge von Ceylon praktisch dasselbe Alter besitzen, und zwar etwa 400 bis 500 Millionen Jahre. Letzteres steht auch im Einklange mit Analysen an praktisch thorfreier Pechblende von derselben Gegend. Danach gehörten diese Pegmatitgänge etwa dem *Silur* oder *Ordovician* an und nicht den ältesten der Gesteine der Erdkruste, wie man ja früher gemeint hat. Die Diskrepanzen der Bleiverhältnisse im Falle der Thoriumminerale (*Devon*) der Kristianiagegend in Norwegen dürften nur teilweise durch das Vorhandensein von gewöhnlichem Blei hervorgerufen sein, größtenteils aber durch eine spätere sekundäre Umgestaltung dieser Mineralien.

⁴⁾ Diese Frage, im Zusammenhang mit den Resultaten von *Holmes* und *Lawson*, wird demnächst an anderer Stelle eingehender behandelt werden.

Es erübrigt noch die Besprechung einer weiteren Voraussetzung der „Blei“-Methode zur Altersbestimmung der Mineralien. Inwiefern sind wir berechtigt, anzunehmen, daß die untersuchten Mineralien seit ihrer ursprünglichen Auskristallisation keine chemischen Umwandlungen in Gestalt einer Anreicherung oder Verarmung an Blei erlitten haben? Daß eine derartige Umänderung von Mineralien stattfindet, ist vielleicht am deutlichsten an den radioaktiven Mineralien von Llano Co., Texas, zu sehen. Das Blei-Uran-Verhältnis für diese Mineralserie variiert zwischen den Werten 0,102 und 1,13 (vgl. *Holmes*, l. c., Tabelle D), und die Ursache dieser Schwankungen ist jedenfalls zum Teile durch Umgestaltung der Mineralien zu erklären, obwohl einige unter ihnen ein ziemlich großes Th/U-Verhältnis aufweisen (vgl. oben). Diese Mineralien kommen in Pegmatitgängen vom späteren Präkambrium vor und sind von sekundären Produkten durchsetzt. Solche Mineralien sind natürlich zu Altersbestimmungen ganz ungeeignet.

In welchem Grade ein Mineral frisch und unverändert ist, kann im allgemeinen mit wenigen Hilfsmitteln an Ort und Stelle festgestellt werden. Nur dasjenige Mineral ist zu Altersbestimmungen geeignet, welches stabil, frisch und ein primäres Produkt der Erstarrung des Muttergesteins ist, in welchem es sich befindet. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, sollen die Blei-Uran-Verhältnisse von gleich alten Uranmineralien untereinander merklich konstant sein. Die Methode liefert nebenbei eine Kontrolle ihrer Zuverlässigkeit, indem eine eventuell übersehene Änderung des Minerals sich durch Inkonzanz der Blei-Uran-Verhältnisse äußert. Wie schon erwähnt, ist also das Kriterium einer zu verlässlichen Altersbestimmungen geeigneten Mineralserie: 1. die Konstanz der einzelnen Blei-Uran-Verhältnisse und 2. ein Atomgewicht für das enthaltene Blei von etwa 206,0.

Entsprechend der Übersichtstabelle der wichtigsten Resultate nach der „Helium“-Methode, die sich im III. Abschnitt befindet, seien hier die derzeit verlässlichsten Resultate nach der „Blei“-Methode in einer Tabelle zum Vergleiche angeben. Die Resultate sind in modifizierter Form aus einer Arbeit von *Holmes* (l. c.) entnommen, sowie auch die nachfolgenden geologischen Anmerkungen betreffs der Einzelgruppen der Tabelle. Diejenigen Minerale, welche ein beträchtliches Th/U-Verhältnis aufweisen, sind in der Tabelle nicht angeführt.

I. Der Uraninit von Glastonbury, Conn., U. S. A., kommt in Pegmatitgängen vor, welche mit einem Granite wahrscheinlich vom späten Carbonalter vergesellschaftet sind. Der Granit ist durch die unteren Carbonschichten durchgedrungen und ist sicherlich *prätriassisch*.

II. Weiter südlich, in den Appalachen von Nord- und Südkarolina, findet man Uraninit in groben Pegmatitgängen, dessen Alter leider unbekannt ist. Das Alter der von den Pegmatiten

Tabelle der wichtigsten Resultate nach der „Blei“-methode.

Serie	Mineral	Fundort	Pb/U-Verhältnisse	Mittleres Alter in Millionen Jahren (= $Pb/U_m \cdot 7900$): Geologische Epoche und sonstige Bemerkungen
I.	Uraninit	{ Glastonbury, Conn., U. S. A.	0,041	Carbon: 320 Millionen Jahre.
	"	"	0,043 Mittel = 0,041	
	"	"	0,040	
	"	"	0,042 0,040	
II.	Uraninit	{ Spruce Pine, Nord-Karolina	0,051* 0,055*	Kambrium bis Tertiär (?): 370 Millionen Jahre Ursprüngliches Blei berücksichtigt = 260 Millionen Jahre. *Atomgewicht des Bleis: 206,4 (Richards und Lemberg).
	"	"	0,049* Mittel = 0,048	
	"	Marietta, S. C.	0,046	
	Zirkon	Nord-Karolina	0,047 0,042	
III.	Zirkon	{ Brevig, Kristiania- Gegend, Norwegen	0,040	Devon (wahrscheinlich Mittel-): 340 Millionen Jahre. Thorblei berücksichtigt = 300 Millionen Jahre.
	"	"	0,046	
	Pyrochlor	"	0,048 Mittel = 0,044	
	Biotit	"	0,044	
	Zirkon	"	0,041	
IV.	Uraninit	Anneröd, Norwegen	0,13	Mittel-Präkambrium (Prä-Jatulian): 1000 Millionen Jahre. *Atomgewicht des Bleis = 206,06 (Hönigschmid und St. Horovitz).
	"	"	0,12	
	Annerödit	"	0,15	
	Uraninit	Elvestad, "	0,14	
	"	"	0,14 Mittel = 0,13	
	"	Skaartorp "	0,135	
	"	Huggenäskenen "	0,13	
Bröggerit	Moos, Norwegen	0,12 0,13* 0,13		
V.	Cleveit	Arendal, Norwegen	0,19*	Mittel-Präkambrium (Prä-Jatulian): 1300 Millionen Jahre. *Atomgewicht des Bleis = 206,08 (Richards und Wadsworth).
	Uraninit	"	0,18 Mittel = 0,18	
	"	"	0,17	
	Xenotim	Naresto, "	0,17 0,21	
VI.	{ Fergusonit Gadolinit	{ Ytterby, Schweden "	0,17 Mittel = 0,16	Mittel-Präkambrium (Ser-archäische Granite): 1100 Millionen Jahre.
VII.	Uraninit	{ Villeneuve, Quebec, Ontario	0,17	Mittel-Präkambrium: 1200 Millionen Jahre.
VIII.	Uraninit	{ Morogoro, Deutsch-Ost- Afrika	0,094*	Geologisches Alter unbestimmt: Jedenfalls jünger als IX u. X, 700 Millionen Jahre. *Atomgewicht des Bleis = 206,05 (Hönigschmid und St. Horovitz).
	"	"	0,092 Mittel = 0,093	
IX.	Zirkon	{ Nrassi-Bassin, Mozambique	0,17	Geologisches Alter unbekannt: Jedenfalls jünger als X. 1100 Millionen Jahre.
	"	{ Monapo-Fluß, Mozambique	0,15 Mittel = 0,15	
	Biotit	Ligonia, Zambesia	0,14	
X.	Zirkon	Mozambique	0,21	Geologisches Alter unbekannt: Von den ältesten gneisähnlichen Graniten. 1500 Millionen Jahre.

durchdrungenen Schichten mag irgendwo zwischen dem Kambrium und dem Tertiär liegen. Die Schwankungen der einzelnen Blei-Uran-Verhältnisse zwischen den Werten 0,042 und 0,055 sind zum Teile chemischen Veränderungen der Mineralien zuzuschreiben. Die ersten zwei und die vierte Probe sind von *Hillebrand* analysiert worden und waren nicht frisch; diese Resultate sind daher von zweifelhaftem Werte. Indes ist das Atomgewicht von Blei aus Nordkarolina-Uraninit von *Richards* und *Lembert* bestimmt worden und das Resultat deutet darauf hin, daß nur 70 % der Gesamtbleimenge radioaktiven Ursprunges sind. Wenn man dies berücksichtigt, so findet man, daß die Nordkarolina-Pegmatitgänge wahrscheinlich etwas jünger als die von Glastonbury sein dürften. Es scheint wahrscheinlich, daß sämtliche uranhaltigen Pegmatitgänge der Appalachen von nicht weit verschiedenem Alter sind, und zwar etwa der Spät-Carbon- oder Kreidegruppe angehören.

III. Bedauerlicherweise kommt der Uraninit in den vulkanischen Devongesteinen der Kristianiagegend in Norwegen nicht vor. Für die angeführten Mineralien ist das Verhältnis Th/U durchwegs weniger als 1,0. Berücksichtigung der hohen Stabilität des Thorbleis läßt es wahrscheinlich erscheinen, daß das wahre Alter für diese Devonformation um etwa 10 % kleiner ist, als der in der Tabelle angeführte Wert. In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, daß nach der Methode der „pleochroitischen Höfe“ die etwas älteren Granite der Grafschaft Carlow, Irland, das Maximalalter 400 Millionen Jahre lieferten.

IV. Bezüglich der präkambrischen Formationen von Skandinavien sind drei Serien von vulkanischen Einbrüchen bekannt, welche radioaktive Mineralien enthalten. Alle drei Serien drangen in die älteren Schiefer- und Quarzitmassen des Präkambriums hinein und wurden zum Teile durch diejenige Denudation abgetragen, welche die Ebene, auf der die Jatulischen Formationen abgelagert wurden, gebildet hatte. Sie gehören daher sämtlich dem mittleren Teil der präkambrischen Epoche zu. Die Lage dieser Gesteine in der präkambrischen Aufeinanderfolge wird durch folgende schematische Anordnung ersichtlich gemacht (siehe die folgende Spalte oben).

Die IV. Gruppe der Mineralien gehört den Pegmatiten der Moosgegend des südlichen Norwegens zu, welche gemeinsam mit Graniten von „post“-kalevischem Alter vorkommen. Die Blei-Uran-Verhältnisse schwanken nur zwischen 0,12 und 0,15, und das Atomgewicht vom Blei aus Bröggerit (Pb/U = 0,13) wurde von *Hönigschmid* und *St. Horovitz* zu 206,06 gefunden. Es sind also in diesem Falle sämtliche Kriterien erfüllt, welche für die völlige Eignung dieser Mineralien zu Altersbestimmungen sprechen, und das für diese Mineralien berechnete Alter kann daher mit vollem Vertrauen akzeptiert werden.

V. Eine ähnliche Mineralserie findet sich in den Pegmatiten der Gegend von Arendal in Süd-

	<i>Fenno-Scandia</i>	<i>Canada</i>
Ober-Präkambrium oder „Ep“-Archäicum „Ep“-Archäicum-Intervall	Rapakivi-Granit	
	Jotnian	Keweenawan
	Jatulian	Animikie
Mittel-Präkambrium oder „Mez“-Archäicum	„Ser“-archäische u. „post“-kalevische Granite	Algoman und „post“-Huron Granite
	Ober-Kalevian	Ober-Huron
	Unter-Kalevian	Unter-Huron
	„post“-bottnische Granite Bottnian	Granit-intrusionen Sudbryan
„Epi“-Laurentisches Intervall		
Unter-Präkambrium od. „Prot“-Archäicum	„post“-ladogische Granite	Laurentische Granite
	Ladogian	Grenvilleserie Keewatinserie Coutchichingserie

norwegen. In diesem Falle dürften die Begleitgranite von „post“-kalevischem bzw. von „post“-bottnischem Alter sein. Vom Verhältnis für den Xenotim (welcher etwa 2 % Thorium enthält) abgesehen, stimmen die Einzelverhältnisse untereinander gut überein und das berechnete Alter ist durch das von *Richards* und *Wadsworth* gefundene Atomgewicht für Blei aus Cleveit (206,08) als sichergestellt anzusehen.

VI. Obleich die Minerale der bekannten Ytterby-Pegmatite („Ser“-archäische Granite) vielfach analysiert worden sind, wurden bisher keine Angaben über den Bleigehalt veröffentlicht. Die zwei in der Tabelle von *Holmes* ausgeführten Bestimmungen deuten darauf hin, daß das Alter dieser Mineralien von der gleichen Größenordnung ist, als das der zuletzt erwähnten zwei Gruppen. Bezüglich ihres Alters unterscheiden sich die „ser“-archäischen und die „post“-kalevischen Granite voneinander nicht, und insofern als eine Korrelation bisher unternommen wurde, wurden sie stets zusammengruppiert.

VII. Eine wertvolle Analyse eines kanadischen mittel-präkambrischen Minerals ist die des Uraninit von Villeneuve, Ontario. Nach *M. E. Wilson*, (des „Canadian Geological Survey“) kommt der uranhaltige Pegmatit mit einem Granit gemeinsam vor, a) welcher in die Grenvilleserie, sowie in die die Grenvilleserie durchdringenden Pyroxengranite eingesprenzt ist, und b) welcher selbst von Diabasgängen „Keweenawan“-ischen Alters durchdrungen ist. Aus diesen Daten geht hervor, daß der Pegmatit einer innerhalb des Mittelpräkambriums der obigen Anordnung enthaltenen Epoche des granitischen Eindringens angehört. Dieser Schluß steht auch mit dem aus der einzigen vor-

handenen Analyse berechneten Alter im guten Einklange.

VIII.—X. Die übrigen Daten zeigen Resultate nach der Bleimethode erstens zur Altersbestimmung im Falle, wo es an anderen Beweismaterialien mangelt, und zweitens, für den Fall, wo eine Reihenfolge der eingedrungenen Eruptivgesteine erkenntlich ist. Im letzteren Falle variieren die Blei-Uran-Verhältnisse entsprechend dieser Reihenfolge der Einzelformationen.

In Deutsch-Ost-Afrika und in Mozambique sind wenigstens drei wichtige Perioden des Graniteindringens zu erkennen. Wie gewöhnlich sind die ältesten Gesteine Schiefer und kristallinische Kalksteine, begleitet von geschichteten Gneisen und gneisähnlichen Graniten. In diese sind Granite mit einer granulitischen Struktur hineingedrungen, und noch später wurde der Komplex von Stöcken massiver Granite und Pegmatite durchdrungen. Zirkon von den gneisähnlichen Graniten von Mozambique liefert ein Alter der Größenordnung 1500 Millionen Jahre, welches auf eine Korrelation mit dem unteren Präkambrium anderer Gegenden hindeutet. Zirkon und Biotit von den granulitischen Graniten von Mozambique liefern ein mittleres Alter von 1000 Millionen Jahre, welches einen Zusammenhang mit dem späten Mittelpräkambrium vermuten läßt. In den massiven Graniten und Pegmatiten von Morogoro in Mittel-Deutsch-Ost-Afrika ist glücklicherweise ein Uraninit enthalten, welcher nicht nur analysiert, sondern auch zu Atomgewichtsbestimmungen angewendet wurde. Für das Atomgewicht des in diesem Minerale enthaltenen Bleis fanden *Hönigschmid* und *St. Horowitz* den Wert 206,05. Somit ist der radioaktive Ursprung dieses Bleis festgestellt, und das aus dem Blei-Uran-Verhältnis berechnete Alter 700 Millionen Jahre ebenfalls vollkommen gesichert.

Zum Schluß sei erwähnt, daß sowohl die radiologischen wie auch die älteren rein geologischen Methoden zur Zeitmessung in der Geologie die *Lehre des Uniformitarismus* zur Voraussetzung haben. Im letzteren Falle nimmt man an, daß die Ablagerung der Sedimente und die Denudation der Gesteine gegenwärtig nicht schneller, aber auch nicht langsamer vor sich gehen, wie zu früheren Zeitepochen. Die entsprechende Annahme im Falle der radiologischen Methoden ist, daß die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans durch geologische Zeiten unverändert konstant bleibt. Zweifellos ist der Grund der Unstimmigkeit zwischen den älteren und den neueren Methoden in einer dieser Voraussetzungen zu suchen.

Joly meint, daß, falls die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans mit der Zeit abnehmen würde, die auf radioaktivem Wege ermittelten Zeitmessungen zu hoch wären, und er sieht darin eine Möglichkeit, die radiologischen Bestimmungen mit den kleinen auf geologischem Wege ermittelten Zeitmessungen in Einklang zu bringen. An einer

Prüfung der Unveränderlichkeit der Zerfallskonstante des Urans im Laufe geologischer Zeiten ist wohl nicht zu denken; da aber die Zerfallskonstanten der kürzerlebigen Radioelemente von der Zeit ganz unabhängig sind, scheint kein Grund vorhanden zu sein, warum für das Uran eine solche Abhängigkeit bestehen sollte. Freilich entsteht das Uran, soviel wir wissen, nicht auf radioaktivem Wege, so wie die übrigen Radioelemente der Uranreihe; daß diese Tatsache aber eine Abhängigkeit der Zerfallskonstante von der Zeit zur Folge haben sollte, scheint äußerst unwahrscheinlich zu sein. Auch angesichts der bekannten Beziehungen zwischen Zerfallskonstanten und Reichweiten der α -Strahler sollte sich eine eventuelle Änderung der Zerfallsgeschwindigkeit des Urans in den „pleochroitischen Höfen“ wahrnehmbar gemacht haben; bisher wurde keine Andeutung dafür in solchen Höfen aufgefunden. Aber ganz abgesehen davon, führt die Annahme einer in früheren Zeitepochen größeren Zerfallsgeschwindigkeit des Urans zu ersten Schwierigkeiten bezüglich des Wärmehaushalts der Erde. Und warum sollte gerade eine Abnahme der Zerfallskonstante mit der Zeit erfolgen? — Eine Zunahme scheint ebenso wahrscheinlich oder unwahrscheinlich!

Viel eher dürfte die Annahme des Uniformitarismus für die geologischen Methoden nicht zu treffen. *Holmes* erörtert diese Frage eingehend in seinem Buche, und nach sorgfältiger Erwägung der maßgebenden Faktoren meint er, daß gegenwärtig die Wirksamkeit der irdischen Agenzien eine abnormale zu sein scheint, und zwar dermaßen, daß im Vergleiche mit der Vergangenheit die Gegenwart durch größere Ablagerungsgeschwindigkeit der Sedimente sowie durch größere Denudationsgeschwindigkeit der Gesteine charakterisiert wird. Berücksichtigung dieses Effektes würde eine Erhöhung der nach den geologischen Methoden gefundenen Zeitwerte bewirken und so die krasse Unstimmigkeit zwischen den alten und den neuen Methoden wenigstens zum Teile ausgleichen. Jedenfalls kann man mit einer gewissen Sicherheit sagen, daß die radiologischen Methoden zur Zeitmessung in der Geologie auf festen Grundlagen ruhen. Die Anwendung der „Blei“-Methode für thoriumarme Uranmineralien ist am wenigsten mit Unsicherheit behaftet, und es besteht immer die Möglichkeit, mittels der „Höfe“- bzw. der „Helium“-Methode eine Kontrolle durchzuführen. Vieles hat sie schon geleistet und man darf wohl die Hoffnung hegen, daß es nicht mehr lange dauern wird, bis mit ihrer Hilfe numerische Werte für sämtliche geologischen Epochen gegeben und viele komplizierte Fragen bezüglich der Korrelation der Eruptivgesteine, namentlich des Archäicums, in verschiedenen Erdteilen gelöst werden.

VI. Literatur.

Barrell, J., zum II. Abschnitte: *Journal of Geology* (1914 und 1915).

Baxter, G. P., Thorvaldson, Th., und Grover, F. L.,