

Anregung zu absoluten Altersbestimmungen radioaktiver Gesteine der Schweiz.

Von

H. HIRSCHI (Braunwald).

(Als Manuskript eingegangen am 16. Juli 1918.)

1. Einleitung.

Mit der Erweiterung und Vertiefung unserer wissenschaftlichen Erkenntnis und unserer Untersuchungsmethoden, erschliessen sich stetsfort neue Anhaltspunkte, um die dem menschlichen Geiste vorschwebenden Ziele zu erreichen. In der Geologie gehören zu den letztern ganz besonders die absoluten Altersbestimmungen gewisser Geschehnisse in und auf der Erdrinde. Wie sehr man sich auch bis in die Gegenwart hinein mit allen zu Gebote stehenden Wissensmitteln bemühte, das wirkliche Alter gewisser geologischer Zeitmerkmale festzulegen, immer blieben die erhaltenen Resultate, vielleicht abgesehen von Versuchen an geologisch jungen, nicht vordiluvialen Ereignissen, im Rahmen der Relativität, in Form von chronologischen Tabellen ohne ein absolutes Zeitmass. Daher muss die Entdeckung der Radioaktivität in der Geologie als ein äusserst fruchtbringendes Rüstzeug zur Erkenntnis der Naturvorgänge speziell in zeitlicher Hinsicht aufgefasst und vom Geologen benutzt werden.

Dies ist bis dahin nur in recht bescheidenem Masse erfolgt. In der Schweiz sind, soweit dem Verfasser bekannt, nur Messungen der radioaktiven Intensität von Gesteinen, Quellen und der Atmosphäre ausgeführt worden,¹⁾ ein Versuch, das absolute Alter von Gesteinen zu ermitteln dagegen noch nicht unternommen worden.

Obleich vorausgesetzt werden darf, dass die Schweizergeologen über Radioaktivität im Wesentlichen orientiert sind, mag manchem die folgende einfache, knappe Darlegung der Grundlagen dieses modernen Gebäudes und dessen auch der Geologie dienenden Räume nützlich sein.

In den am Schluss zitierten Werken sind auch ausführliche Literaturverzeichnisse enthalten, auf die verwiesen wird. Die Arbeiten von Robert W. Lawson waren für die nachfolgenden Darlegungen besonders nützlich.

¹⁾ Gockel, Radioaktivität von Boden und Quellen. Sammlung Vieweg. Heft 5, 1914.

Allgemeines über die Radioaktivität.

In die Klasse der radioaktiven Stoffe werden jetzt allgemein solche eingereiht, welche die Eigenschaft besitzen, spontan Strahlen auszusenden, die u. a. imstande sind, für gewöhnliches Licht undurchlässige Materie zu durchdringen, photochemische Prozesse auszulösen und elektrisch geladene Körper durch Ionisation der umgebenden Gase zu entladen. Immerhin müssen unter radioaktive Stoffe auch diejenigen Zwischenglieder in den radioaktiven Elementgruppen noch einbezogen werden, die sich, obwohl ohne merkliche Strahlung, in neue strahlende Elemente transformieren.

Man unterscheidet drei Hauptstrahlengruppen, α , β , γ , die sich chemisch und physikalisch charakterisieren.

α -Strahlen sind positiv geladene Heliumatome, die vom zerfallenden Radioatom mit einer durchschnittlich $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit betragenden Geschwindigkeit fortgeschleudert werden, um am Ende der Bahn in stofflich normale Atome überzugehen. Ihnen wesensverwandt sind die positiv geladenen, rasch bewegten Atome und Moleküle der Kanalstrahlen.

β -Strahlen entsprechen schnell bewegten, negativ geladenen Elektronen, die bis nahezu Lichtgeschwindigkeit erreichen und mit den ebenfalls negative Ladung tragenden Kathodenstrahlen übereinstimmen.

γ -Strahlen beruhen, wie jetzt allgemein angenommen wird, wie das gewöhnliche Licht und die Röntgenstrahlen auf elektromagnetischen Impulswellen. Einige namhafte Forscher schreiben auch ihnen korpuskularen Charakter zu und nehmen sie als neutrale, ungeladene Teilchen an.

Als Korpuskel mit elektrischer Ladung sind die α - und β -Strahlen durch elektrische und magnetische Felder ablenkbar.

Alle drei Strahlengruppen bewirken in Luft und andern Gasen Ionisation, welche zur Ausarbeitung der besten und empfindlichsten qualitativen und quantitativen Messmethoden geführt hat. Die ionisierende Wirkung ist für die verschiedenen Strahlengruppen und Strahlen quantitativ verschieden. Bei den Korpuskularstrahlen entsteht oder verschwindet sie mit einer bestimmten untern Geschwindigkeitsgrenze.

Für die absolute Zeitmessung sind vorläufig nur das aus den α -Strahlen resultierende Helium und die beim radioaktiven Zerfall übrigbleibenden chemisch stabilen Endprodukte verwendbar. (Im Wärmehaushalt der Erde kommt überdies als sehr wichtiger Faktor die beim radioaktiven Zerfall produzierte Wärme in Betracht. Ein

Gramm Radium würde bis zu seinem vollständigen Zerfall in das stabile Endprodukt (Uranblei oder RaG) etwa drei Milliarden Grammkalorien Wärme erzeugen, äquivalent dem Energieinhalt von 400 Kilogramm guter Steinkohle oder Anthrazit). Das aus α -Strahlen entstandene Helium kann unter bestimmten Verhältnissen fast quantitativ aufgespeichert sein, ebenso, aber noch besser die beim radioaktiven Zerfall restierenden stabilen Endprodukte, die Bleisotopen. Dies ermöglicht unter bestimmten Verhältnissen eine quantitative Ermittlung aller dieser Zerfallsprodukte, was wichtige Rückschlüsse in bezug absoluter Altersbestimmungen gestattet.

Als primäre Mutterradioelemente gelten zunächst nur Uran und Thorium. Das Actinium, nünmehr auch Protactinium genannt, gilt dagegen als Abzweig innerhalb der Uranreihe.¹⁾ Von Kalium und Rubidium kennt man zurzeit nur β -Strahlenemission, aber keine Zerfallsprodukte.

Für die absolute Altersbestimmung von Gesteinen ist die Anwesenheit von Uran und Thorium eine Vorbedingung. Wir wissen aber, dass diese Elemente in allen Gesteinen, wenn auch meist in äusserst geringen Mengen zugegen sind. Die Beträge schwanken z. B. für die Gesteine des Gotthardtunnels von 0,2 bis $4,3 \times 10^{-6}$ gr. Thorium per Gramm Gestein und von 0,7 bis $14,3 \times 10^{-12}$ für Radium. Uran ist im Mittel in der Erdkruste in etwa gleicher Menge vertreten wie Thorium.

Der radioaktive Zerfall geht, das ist der Kardinalpunkt, nach ganz bestimmten Zerfallsgesetzen vor sich, die absolut unabhängig von irgend welchen äusseren physikalischen und chemischen Bedingungen sind. Uran und Thorium sowie das sekundäre Mutterelement Protactinium haben ihre eigene Zerfallreihe, die u. a. eine bestimmte Zahl α -Strahler enthält. Jedes dieser Mutterelemente, sowie deren radioaktive Zerfallsprodukte haben eine ganz bestimmte Lebensdauer. Die Zahl der von jedem Radioelement in der Zeiteinheit zerfallenden Atome ist in jedem Moment proportional der Anzahl noch unzerfallener Atome. Dieser Atomzerfall vollzieht sich nach einem Exponentialgesetz, das durch die einfache Formel $N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ gegeben wird, worin N_t die Anzahl zur Zeit t existierenden unzerfallenen Atome, N_0 ihre Anzahl zur Zeit 0,

¹⁾ Man könnte versucht sein, auch das Thorium in genetische Beziehungen zum Uran zu bringen, obgleich vorläufig verschiedene Data, darunter speziell das Atomgewicht des Thoriums und das Fehlen eines Gleichgewichtszustandes zwischen diesen beiden Elementen in den Uran-Thormineralien, dem Thorium noch keinen Raum in der Uranzerfallsreihe gewähren. Bei der Komplexität der radioaktiven Erscheinungen und der daran beteiligten Stoffe sind aber vielerlei Annahmen möglich.

λ die Zerfallskonstante des bestimmten Radioelementes von der Dimension einer reziproken Zeit, e die Basis der natürlichen Logarithmen bedeutet. Aus diesem auch experimentell erkannten Gesetz ergibt sich, dass die Zerfallsgeschwindigkeit und damit proportional auch die Intensität der Radioaktivität einer quantitativ und qualitativ gegebenen radioaktiven Substanz stetig abnimmt. Für langsam zerfallende Elemente, wie das Uran z. B., wird deshalb der gänzliche Zerfall einer gewissen Gewichtsmenge erst in unfassbar langer Zeit erreicht. Für die Lebensdauer eines radioaktiven Elementes führte man daher die übersichtlicheren Grössen „Halbwertzeit“, „Mittlere Lebensdauer“ und „Zerfallskonstante“ ein. Unter Halbwertzeit z. B. ist diejenige Zeitgrösse verstanden, innerhalb welcher genau die Hälfte einer Gewichtsmenge eines Radioelementes zerfällt. (Für Uran ist diese Grösse = $4,9 \times 10^9$ Jahre, für Radium = 1733 Jahre¹⁾ etc.)

Ohne auf die rechnerischen Operationen einzugehen gelten zwischen Halbwertzeit T , Mittlerer Lebensdauer τ und Zerfallskonstanten λ die numerischen Beziehungen $T = 0,69315 \times \frac{1}{\lambda} = 0,69315 \tau$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1,4428 T$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = 0,69315 \times \frac{1}{T}$$

$$0,69315 = \text{Log. nat. } 2$$

Es liegt nun auf der Hand, dass für die Messung der in der Geologie vorkommenden hohen Zeitgrössen nur die langlebigen Radioelemente in Betracht kommen können. Zwischen den radioaktiven Zerfallprodukten, sowohl unter sich, als gegenüber ihrem Mutterelement, stellt sich schliesslich stets ein Gleichgewichtszustand ein, in welchem deren Atomzahlverhältnis konstant bleibt. So finden wir in einem primären, völlig frischen Uranmineral stets das Verhältnis 1 Gramm Uran auf $3,33 \times 10^{-7}$ Gramm Radium. Bemerket sei noch, dass dieses im Gleichgewichtszustand konstant bleibende Atomzahlverhältnis mit der Lebensdauer der einzelnen Radioelemente in genauer Beziehung steht.

Der radioaktive Abbau des Uranatoms (ebenso desjenigen des Thorium; Actinium dagegen noch unsicher) vollzieht sich zuerst durch Aussendung von α -Strahlen, also von Heliumatomen, wodurch, da das Atomgewicht von Helium = 4 ist, mit jedem α -Strahl das Atomgewicht des entstandenen Zerfallproduktes um vier Einheiten tiefer steht. Durch Abgabe von drei Heliumatomen in Form von α -Strahlen

¹⁾ Die neusten Messungen durch V. F. Hess und Robert W. Lawson ergeben 1580 Jahre. (Mitt. aus dem Institut für Radiumforschung, Nr. 105).

geht aus dem Uranatom das Radiumatom hervor, dessen Atomgewicht 238 minus $3 \times 4 = 226$ ist.

Bis zum völligen Zerfall des Uranatoms durch die verschiedenen radioaktiven Zwischenprodukte hindurch, sind neben β und γ -Strahlen acht α -Strahlensendungen ermittelt. Das stabile Endprodukt des radioaktiv zerfallenen Uranatoms ist Uranblei (Ra G) dessen Atomgewicht bisher genauest zu $206,4$ ($\pm 0,08$ bis $0,18$) (theoretisch 238 minus $8 \times 4 = 206$) bestimmt ist. Das Uranblei ist mit dem gewöhnlichen Blei (Atomgewicht = $207,18$) isotop. Die Differenz im Atomgewicht zwischen Uranblei und gewöhnlichem Blei, welche noch nicht aufgeklärt ist, bildet das Mittel, diese beiden Blei voneinander zu unterscheiden.

Das stabile Endprodukt der Thorreihe scheint speziell Thorblei (Th E) zu sein mit dem genauesten bisher ermittelten Atomgewicht $207,77$ ($\pm 0,04$), das mit dem gewöhnlichen Blei ebenfalls isotop ist. Theoretisch sollte das Atomgewicht des Thorblei $208,12$ sein, nämlich $232,12$ minus sechs Heliumatome.

Ausser Helium und den stabilen Endprodukten kommen für die geologische Zeitmessung in besonderen Fällen auch noch die sog. pleochroitischen Höfe in Anwendung, sofern diese durch radioaktive Einschlüsse veranlasst werden. In diesen Fällen sind solche Höfe deutlich zonar. Die einzelnen mikroskopisch feinen, schalenförmig sich umschliessenden Verfärbungszonen verdanken ihren Ursprung in erster Linie den verschiedenen, verfärbenden α -Strahlengruppen, deren maximale Reichweiten jeweils dem äusseren Radius jeder Schale entspricht. Die Verfärbung eines pleochroitischen Hofes ist abhängig von der radioaktiven Intensität des Zentralschlusses einerseits und dem Alter des Minerals andererseits. Verschiedene Entwicklungsstadien der natürlichen Höfe entsprechen jeweils der Menge emittierter α -Strahlen des radioaktiven Kerns und werden mit unter genau bekannten Bedingungen künstlich erzeugter Höfe verglichen. Dabei muss allerdings der radioaktive Stoffgehalt (spez. an Uran und Thorium) des Kerns, der meist aus Zirkon, Brookit, Thorit, Orthit, Titanit etc. besteht, bekannt sein. Bis anhin musste man sich in letzterer Hinsicht mit Abschätzung des Urangehaltes solcher Einschlüsse begnügen.

Bemerkenswert ist die Wahrnehmung, dass die pleochroitischen Höfe nur in geologisch älteren Mineralien auftreten, in tertiären dagegen so gut wie unbekannt sind. Ausnehmend starke Radioaktivität, welche die Zeit kompensieren könnte, scheint in den radioaktiven Einschlüssen pleochroitischer Höfe daher nicht angenommen werden zu müssen, sondern dürfte sich innerhalb gewisser Grenzen bewegen.

Das Alter eines Gesteins wird nun entweder nach der Helium- oder Bleimethode bestimmt. Gleichzeitige Anwendung beider Methoden bietet eine Kontrolle. Die Heliummethode liefert gegenüber der Bleimethode meist viel kleinere Werte, was wohl in der weniger vollständigen Aufspeicherungsmöglichkeit von Helium gegenüber den bleiartigen Endprodukten liegt. Die Bleimethode ist unbedingt zuverlässiger.

Für die beiden Methoden gelten nachstehende Formeln, deren Begründung u. a. in der Mitt. Nr. 100 von Lawson aus dem Institut für Radiumforschung in Wien zu finden ist.

$$\frac{\text{He}}{(\text{U} + 0,285 \text{ Th})} \times 9,1 \text{ Millionen Jahre}$$

He = Volumen Helium in cm³ pro 100 gr. Mineral

U = vorhandenes Uran

0,285 Th = Uranaequivalent des Thoriumgehaltes

Ein Gramm Uran samt Zerfallsprodukte erzeugt pro Jahr $11,0 \times 10^{-8}$ cm³ Helium = $1,97 \times 10^{-11}$ gr.

$$\frac{\text{Pb}}{(\text{U} + 0,384 \text{ Th})} \times 7900 \text{ Millionen Jahre}$$

In dieser Formel ist der prozentuale Gehalt des Minerals an Blei, Uran und Thorium zu setzen. Die Grösse 0,384 entspricht auch hier dem Uranaequivalent.

Eine streng genommen in dieser letztern Formel anzubringende Korrektur kann für praktische Zwecke vernachlässigt werden.

Ein Gramm Uran erzeugt pro Jahr $1,27 \times 10^{-10}$ gr. Ra G (Uranblei).

Um möglichst einwandfreie Altersbestimmungen von radioaktiven Mineralien bezw. Gesteinen zu erhalten, wollen wir noch folgende Vorbedingungen hervorheben:

1. Das Mineral muss auf primärer Lagerstätte und völlig frisch und ebenso in ganz frischem Gestein eingeschlossen sein.

2. Die Uranmineralien sollten möglichst thoriumfrei sein, damit nicht das stabile Endprodukt des Thoriums (Thorblei) das Uranblei, dessen Atomgewicht ein wichtiges Kriterium ist, verunreinige und umgekehrt sollten die zu untersuchenden Thoriummineralien möglichst frei von Uran sein. Immerhin lässt sich, wie obige Formeln zeigen, das Thorblei- respektive Uranbleiaequivalent einführen.

3. Das Atomgewicht des isolierten Uranblei soll möglichst nahe 206,0 sein, dann ist es auch wirklich nur aus Uran hervorgegangen. Thorblei dagegen verlangt theoretisch ein Atomgewicht von 208,12. Je näher das Atomgewicht der beiden abgetrennten isotopen Blei den genannten Werten kommt, umso besser eignet sich das Mineral zu Altersbestimmungen.

Über die Verwendung des Thoriums zu Altersbestimmungen orientiert uns die obgenannte Mitteilung von Robert W. Lawson. In

seinen beiden Arbeiten (s. Literaturverzeichnis) finden sich Zusammenstellungen von Altersbestimmungen ausländischer Mineralien und Gesteine nach der Blei- und Heliummethode.

In obigen Darstellungen ist flüchtig dargelegt, wie vorläufig in gewissen Fällen absolute Altersbestimmungen an Mineralien bzw. Gesteinen vorgenommen werden können, womit den Geologen ein bisher utopisch gebliebener, tiefer Wunsch zur Realisierung gelangt. Der Anfang, dies hohe Ziel zu erreichen, ist gemacht, das Gerüst geschaffen, das uns an dem noch steilen Weg Halt gewährt. Dies Gerüst ist aber stetig zu vervollkommen, zu verstärken, aber auch stetig durch scharfsinnige Kritik von Fehlern zu befreien.

Spezielles über schweizerische Eruptivgesteine.

In der Schweiz, mit ihren vielen, auch radioaktive Mineralien führenden Eruptivmassen würden sich Gesteine finden lassen, die sich für absolute Altersbestimmungen auf radioaktivem Wege eignen.

Bis dahin sind, wie eingangs gesagt, derartige Bestimmungen noch nicht durchgeführt worden, sondern nur Messungen über die Intensität der Aktivität von Gesteinen, die für absolute Altersbestimmungen höchstens als Fingerzeig dienen können. Einen solchen Fingerzeig geben uns auch gewisse radioaktive Quellwässer. Dass solche Altersbestimmungen für die Geologie der Schweiz von ganz eminenter Bedeutung sein können, ganz besonders inbezug auf die zeitliche Festlegung der grossen tektonischen Vorgänge und indirekt der Entstehung gewisser Sedimentgruppen, braucht nicht besonders betont zu werden.

Wir wollen hier nur zwei Intrusivgesteinszonen als Beispiel anführen. Die eine Zone liegt im östlichen Aarmassiv zwischen Reusstal und Kistenpass, representiert durch Gesteine eines mannigfach differenzierten, granitodioritischen Magmas, speziell durch Syenite, Granite, Diorite und deren Gangfolgen.

Insbesondere hat Fr. Weber in seiner schönen Arbeit „Über den Kali-Syenit des Piz Giuf und Umgebung und seine Gangfolgegeschicht“¹⁾ diese Gesteine, die für die vorliegende Anregung besonders in Betracht fallen, petrographisch genau beschrieben. Bewunderungswürdig sind seine scharfen, eingehenden Beobachtungen über die sog. pleochroitischen Höfe um Orthit (Allanit) und Zirkon, als hätte er eine Ahnung gehabt über die tiefere Bedeutung, welche diesen Höfen noch zukommen sollte.

¹⁾ Beiträge zur geolog. Karte der Schweiz. Neue Folge, XIV. Inaugural-Dissertation 1904.

Seine Angaben über den Aufbau und die Dimensionen dieser Höfe gestatten uns direkt die Voraussagung der radioaktiven Elemente, die sie veranlasst haben. Einige Stellen aus Webers Arbeit sollen deshalb hier wörtlich folgen (Seite 57): „Von der Gestalt des Orthits ist nur die Form des Hofes abhängig, nicht aber seine Breite, die auch bei nicht isometrischer Gestalt des Kerns rings um denselben die gleiche bleibt...“ „Im Biotit ist der Hof nicht selten doppelt: den Orthit von 0,01—0,02 mm umgibt zunächst ein brauner Hof von 0,02 mm und diesen wiederum ein 0,01 mm breiter schwarzer Ring (|| α braungelb)“.

Wie oben erwähnt, entsprechen die äusseren Ränder jeder Zone (Schale) eines pleochroitischen Hofes der Reichweite der verschiedenen α -Strahlen. In Biotitsubstanz wurden folgende Reichweiten von α -Strahlen bestimmt:

von Uran	= 0,013	Millimeter
„ Ra C	= 0,033	„
„ Th C	= 0,04	„

Der von Weber erwähnte doppelte Hof hatte eine Totalbreite von $0,02 + 0,01 = 0,03$ mm, was auf α -Strahlen von Radium C schliessen lässt. Der äussere dunkle Ring entspricht der maximalen Verfärbung, die bei Geschwindigkeitsabnahme der α -Strahlen gegen das Ende ihrer Reichweite — wo sie in gewöhnliche Heliumatome übergehen — eintritt.

Die von Weber gemessenen grossen Hofbreiten bis 0,075 mm sind wohl durch kristallographisch-chemische Momente der verfärbten Mineralien Biotit und Hornblende bedingt, eventuell auch durch chemische Prozesse, welche von den begleitenden, viel durchdringenderen β - und γ -Strahlen begünstigt oder von diesen selbst hervorgerufen werden. Es unterliegt keinem Zweifel, dass die Zirkone und Orthite in den von Weber beschriebenen Gesteinen radioaktive Elemente führen und also eventuell zu absoluten Altersbestimmungen verwendbar sind. (Möglicherweise ist der Zirkon teilweise als Thorit zu bestimmen, mit welchem ersterer zum Verwechseln ähnlich ist.)

Die pleochroitischen Höfe wurden durch Weber in fast allen von ihm untersuchten Gesteinen beobachtet, speziell in den basischen Ausscheidungen der basischen Randfazies des Syenits.

Verfasser hat die Bearbeitung dieser Gesteine hinsichtlich ihrer Radioaktivität an die Hand genommen und wird darüber später in einer andern Arbeit berichten.

Die zweite Gesteinszone, deren absolute Altersermittlung geologisch in mancher Hinsicht sehr bedeutungsvoll wäre, liegt in den tertiären granitischen Durchbrüchen, welche zwischen dem Bergell

und Veltlin ihre Hauptausbreitung erlangen und einen Ausläufer bis Bellinzona hinsenden. Die Verbreitung dieser tertiären Eruptiva findet sich in den „Tektonischen Karten der südöstlichen Schweizeralpen“, Beiträge 1916 von Rudolf Staub.

Obgleich die mikroskopischen Untersuchungen dieser Gesteine noch nicht veröffentlicht sind, kann bei dem z. T. tonalitischen Charakter derselben die Anwesenheit radioaktiver Accessoria mit Sicherheit vorausgesagt werden. Zwar sollten bei dem jugendlichen Alter der Gesteine die auf radioaktivem Wege entstandenen pleochroitischen Höfe fehlen oder nur embryonal entwickelt sein, trotz Anwesenheit radioaktiver Kerne.

Rudolf Staub hat in seiner schönen Arbeit „Petrographische Untersuchungen im westlichen Berninagebirge in den granitischen Gesteinen, den Serizitalbitgneissen, Apliten, Monzoniten und deren Ganggesteinen etc., oft reichlich Orthit und Zirkon als Kerne in pleochroitischen Höfen beobachtet, sodass auch da radioaktive Substanzen vorliegen werden, die zu absoluten Altersbestimmungen dienen können.

Ich habe mich darauf beschränken müssen, bloss diese wenigen, anregenden Beispiele hervorzuheben, obgleich noch viele Beobachtungen anderer Forscher innerhalb unserer Landesgrenze angeführt zu werden verdienten.

Für die Sedimentgesteine, die fast durchwegs mehr oder weniger radioaktiv sind, besitzt man zur Zeit noch keinen gangbaren Weg, ihr absolutes Alter direkt zu ermitteln. Indessen ist ein solcher Weg nicht von vorneherein als unmöglich zu bezeichnen. Vielleicht wird man zunächst so weit kommen, auf radioaktivem Wege verschiedene Sedimente in absolutem Zeitmass vergleichen zu können, dass man z. B. zwischen zwei petrographisch-faziell gleichen Sedimenten verschiedener geologischer Epochen die absolute Altersdifferenz bestimmt.

Für die praktische Durchführung von absoluten Altersbestimmungen kann u. a. folgender Weg betreten werden:

Von dem wichtigen, vermutlich radioaktiven Gestein wird eine gute Durchschnittsprobe von etwa 1 kg gesammelt und sehr fein pulverisiert. Ein Gramm hiervon wird noch feiner pulverisiert bis zur Korngrösse unter 0,01 mm, damit alle radioaktive Strahlung die Körnchen verlassen kann. Dieses äusserst feine Gesteinspulver wird in gleichmässiger Schicht, z. B. mit Alkohol, auf eine tellerförmige Platte aufgeschwemmt. Diese wird nach Ausglühen (zum Entfernen vorhandener Emanation) sofort in das Instrument für elektrometrische Messungen (z. B. Jonometer) eingeführt, mit welchem sich auf Grund der bewirkten Jonisation die Intensität der Radioaktivität des

Gesteinsmaterials herausstellt. Ist diese bedeutend höher als der Durchschnittswert der Eruptiva, so kann das Gestein für absolute Altersbestimmung geeignet sein.

Nun folgt eine genaue mikroskopische Untersuchung, bei der sich zeigen wird, welche Gesteinsaccessorien die hohe Radioaktivität des Gesteins bedingen. Diese Accessoria werden alsdann in genügenden Mengen nach den üblichen mechanischen Methoden aus dem Gesteinspulver getrennt, um daraus durch äusserst feine chemische Analysen den Gehalt an Uran, Thorium, Helium und Blei zu bestimmen. Das geologische Alter ergibt sich nach den auf Seite 70 erwähnten Formeln aus dem Verhältnis von Blei und Helium zu Uran oder Thorium.

Diese ausserordentlich viel Sorgfalt, Zeit und Sachkenntnis erfordernden Arbeiten können teilweise nur von Spezialisten und in besonderen Instituten ausgeführt werden. Das Resultat ist aber auch entsprechend wertvoll; denn heute sind die Radiologen darüber einig, dass die oben skizzierten Anschauungen theoretisch einwandfrei sind und nur die äusserst genaue Ausführung der praktischen Arbeiten zu vervollkommen bleibt.

In der Radioaktivität als Zweiggebiet der Radiologie bleibt endlos vieles noch zu leisten, auf dass uns Licht werde in den tiefsten Tiefen naturwissenschaftlichen Erkennens, an dem auch die Geologie mitzuwirken hat und gleichzeitig Ergänzung finden wird.

Nachtrag.

Nachdem das Manuskript zu den vorstehenden Darlegungen abgeschlossen war, erhielt ich von meinem Freund Rudolf Staub Mitteilungen über die Eruptiva des Bergellermassivs, welche hier in extenso als Nachtrag folgen mögen:

„Zirkon und Orthit sind, soweit ich bis jetzt urteilen kann, in den jungtertiären Eruptivgesteinen des Bergellermassivs in ungefähr gleicher Quantität vorhanden, wie in den jungpaläozoischen Eruptiva des Berninagebirges.

Der Zirkon zeigt die gewöhnlichen Eigenschaften, der Orthit ist meist von bedeutend hellerer Farbe als im Engadin. Kräftig braune Töne im Pleochroismus sind selten. Desgleichen fällt als ein Hauptunterschied der Bergellerorthite gegenüber denen der alten Berninagesteine auf: das fast völlige Fehlen der dort so häufigen Epidotkränze. Die Umwandlung des Orthits in Epidot und Zoisit, unter Abgabe von Fe_2O_3 und der seltenen Erden ist also in den jungen Eruptiva des Bergells noch lange nicht so weit vorgeschritten wie in den

alten Berninagesteinen. Man kann auch daraus ohne weiteres das bedeutend höhere Alter der letztern beweisen.

Pleochroitische Höfe um Zirkon und Orthit kommen auch in den Bergellergesteinen vor, jedoch in sehr verschiedenem Masse. — Das Hauptgestein, der porphyrtartige Bergellergranit, zeigt in vielen Fällen nicht die geringste Spur von pleochroitischen Höfen, in andern Fällen aber kommen solche vor, sowohl um Zirkon wie um Orthit. Auch in dem feinkörnigen Novategranit der Cacciabella z. B. sind die Höfe recht verschieden. Ich traf dort Orthite ohne jeden Hof und winzige Höfe um Zirkon einerseits, anderseits aber auch solche, die den Durchmesser des Zirkonkornes bis auf das Zehnfache übertrafen. Solch riesige Höfe bilden aber eine Ausnahme, die zwar momentan noch nicht genau zu erklären ist, deren Grund ich aber zu erklären bestrebt sein werde. Es könnte sich dabei eventuell um ganz versteckte, letzte Reste eingeschmolzener alter Gesteine, d. h. deren Biotite handeln, doch ist diese Frage jetzt erst noch schwer zu entscheiden. — Der Tonalit und Diorit des jungen Massivs zeigt in der Regel auch nur ganz kleine Höfe oder aber, und dies in vielen Fällen, gar keine.

Ein bestimmtes, allgemein gültiges Gesetz lässt sich also an diesen Eruptiva an und für sich betrachtet, nicht aufstellen. Sehr lehrreich gestaltet sich aber der Vergleich der Eruptiva mit ihren ältern Einschlüssen von Gneissen, Amphiboliten etc. Dort sind die pleochroitischen Höfe ganz allgemein in viel grösserer Quantität und meist auch bedeutend grösserem Umfange vorhanden. Der Unterschied ist oft ganz frappant. Auch Mineralien, die in den jungen Eruptiva noch keine Spur von Höfen zeigen, wie z. B. der Titanit, weisen in den alten Amphiboliten z. B. bedeutende Höfe auf.

Ich glaube, gerade diese Differenz ist bei dieser Altersfrage der beteiligten Gesteine von ausschlaggebender Bedeutung, und es lässt sich demnach meine bisherige Erfahrung in folgenden Satz zusammenfassen:

Der Altersunterschied zwischen den jungen Bergellereruptiva einerseits, den alten Berninagesteinen und den ältern Bergellereinschlüssen anderseits äussert sich nicht etwa in dem völligen Fehlen der pleochroitischen Höfe einerseits, und in deren Vorhandensein anderseits, sondern dieser Altersunterschied kommt nur, aber in starkem Masse, in deren verschiedener Quantität zum Ausdruck. Auch die jungen Gesteine weisen pleochroitische Höfe auf, aber viel weniger und viel kleinere als ihre alten Verwandten.“

Dieser Nachtrag ist für unser Thema ein wertvoller Fingerzeig.

Wie für die Gesteine am Piz Giuf und Umgebung, soll in einer spätern Arbeit von mir eingehenderes berichtet werden. Die in den jungen Bergellereruptiva auftretenden breiten pleochroitischen Hofbildungen halte ich, sofern diese radioaktiven Ursprungs sind, unbedingt als an ältere eingeschmolzene Gesteinsreste gebunden.

Hauptliteratur.

- Rutherford. Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen. Marx, Handbuch der Radiologie. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft 1913.
- St. Meyer und E. v. Schweidler. Radioaktivität. Verlag Teubner. 1916.
- A. Gockel. Die Radioaktivität von Boden und Quellen. Sammlung Vieweg 1914.
- Robert W. Lawson. Über absolute Zeitmessung auf Grund der radioaktiven Erscheinungen. Die Naturwissenschaften. 1917, Heft 26/27.
- Robert W. Lawson. Das Alter der Thoriumminerale. Mitt. Nr. 100 aus dem Institut für Radiumforschung in Wien.
- Besonders in den zwei ersten Fundamentalwerken finden sich vollständige Literaturverzeichnisse, auf die verwiesen wird, während die Arbeiten von Lawson für den Geologen wichtige Tabellen über absolute Altersbestimmungen von Mineralien und Gesteinen enthält.
- Die Arbeit von A. Gockel enthält viele Tabellen über Thorium- und Radiumgehalt von Gesteinen und praktische Messmethoden, wie sie speziell für Geologen geeignet sind.