

WAS LEHRT UNS DIE RADIOAKTIVITÄT ÜBER DIE GESCHICHTE DER ERDE?

VON

PROFESSOR DR. O. HAHN

II. DIREKTOR DES KAISER-WILHELM-INSTITUTS
FÜR CHEMIE IN BERLIN-DAHLEM

MIT 3 ABBILDUNGEN



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1926

ISBN 978-3-642-49551-9 ISBN 978-3-642-49842-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-49842-8

**ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN.
COPYRIGHT 1926 BY JULIUS SPRINGER IN BERLIN**

Vorwort.

Der Bedeutung der Radioaktivität für die Geschichte unserer Erde wird im Auslande — vor allem in England und den Vereinigten Staaten von Amerika — ein in der letzten Zeit stets wachsendes Interesse entgegengebracht. In Deutschland ist die Kenntnis der hierher gehörigen Fragen kaum über die Reihen der speziell interessierten Fachleute hinausgekommen, und dieser Kreis ist sehr klein. Die Originalarbeiten wurden fast alle im Auslande ausgeführt und sind hier nicht leicht zugänglich.

Die einzige dem Verfasser bekannte ausführliche Zusammenstellung in deutscher Sprache stammt von R. W. Lawson und erschien in den Naturwissenschaften im Jahre 1917.

Seit dieser Zeit sind manche Fragen geklärt und neue Erkenntnisse hinzugekommen. Durch eine kritische Würdigung des ganzen Erfahrungsgebietes läßt sich jetzt mit ziemlicher Sicherheit feststellen, was wir als festen Bestand in unser Wissen aufnehmen können, was noch hypothetisch und was endlich als irrtümlich auszuschließen ist.

Die vorliegende Schrift ist eine Erweiterung eines Vortrags, den der Verfasser in einer öffentlichen Sitzung der Preußischen Akademie der Wissenschaften am 21. November 1925 gehalten hat. Der Vortrag wendet sich an den allgemein interessierten Laien und soll kein Fachvortrag sein.

Die Erläuterungen und Zusätze dagegen sind, teilweise wenigstens, für den spezieller vorgebildeten Fachgenossen bestimmt. Sie geben genauere Belege für eine Anzahl der im Hauptteil gebrachten Angaben und bringen auch eine kritische Erörterung derjenigen Ansichten, die mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen nicht im Einklang zu stehen scheinen.

Berlin, März 1926.

Otto Hahn.

Inhaltsverzeichnis.

Erstes Kapitel.

Einleitung und Problemstellung	I
--	---

Zweites Kapitel.

Das Alter der festen Erdkruste	10
a) Altersbestimmungen aus dem Heliumgehalt	10
b) Altersbestimmungen aus dem Bleigehalt	14
c) Altersschätzungen aus pleochroitischen Höfen	23

Drittes Kapitel.

Der Wärmehaushalt der Erde	27
--------------------------------------	----

Viertes Kapitel.

Die rhythmischen Oberflächenänderungen der festen Erdkruste	35
---	----

Fünftes Kapitel.

Erläuterungen und Zusätze	42
Zu Kapitel 1	42
„ „ 2	43
„ „ 3	56
„ „ 4	60

Erstes Kapitel.

Einleitung und Problemstellung.

Das vor einem knappen Menschenalter erschlossene Gebiet der Radioaktivität hat in der kurzen Zeit seines Bestehens einen tiefgehenden Einfluß auf die verschiedensten Zweige naturwissenschaftlicher Forschung ausgeübt. Nicht nur die großen Nachbargebiete Physik und Chemie sind durch die Erkenntnis der den radioaktiven Erscheinungen zugrunde liegenden Gesetze auf eine vollständig neue Basis gestellt worden, sondern auch scheinbar ganz fernliegende Gebiete werden in steigendem Maße von den neuen Erkenntnissen befruchtet, ja die Fragen des Weltgeschehens werden mit den subtilen Vorgängen im Innern der Atome verknüpft.

So hat Nernst in einem vor einigen Jahren in der Preussischen Akademie der Wissenschaften gehaltenen Vortrage*) die die Menschheit von alters her beschäftigenden Probleme der Kosmologie behandelt. Er sprach über die Vorgänge, die dem Werden und Vergehen der Weltkörper zugrunde liegen und die Gesetze, die, folgerichtig angewendet, uns den schmerzlichen Gedanken im Hintergrunde erscheinen lassen, daß die Welt in einen ewigen Kirchhof sich zu verwandeln strebt. Um diesen in allen seinen Folgerungen sicher unbefriedigenden einseitigen Ablauf der Naturgesetze zu umgehen, machte Nernst die kühne Hypothese, daß

*) W. Nernst: Das Weltgebäude im Lichte der neueren Forschung. Berlin 1922. Verlag von Julius Springer.

sich im Weltenraum durch gelegentliche Schwankungen der Nullpunktsenergie des Lichtäthers Atome chemischer Elemente bilden mögen, und zwar hochaktiver Radioelemente, die dann ihrerseits als Keime neuentstehender Welten dienen könnten. Der sichere Nachweis einer aus dem Weltenraum kommenden sehr durchdringenden Strahlung bringt uns ja in der Tat den Beweis, daß radioaktive Prozesse auch außerhalb unserer Erde vor sich gehen. Welcher Art diese Prozesse sind, entzieht sich allerdings heute noch unserer Kenntnis.

Das Thema, das uns hier beschäftigen soll, ist wesentlich enger begrenzt. Es handelt nicht vom Werden der Welten, ihrem Sein und Vergehen; es beschränkt sich auf jenes winzige Staubkörnchen in der Größe und Mannigfaltigkeit unseres Weltsystems, das wir als unsere Erde kennen, deren zufällige Existenzbedingungen es mit sich gebracht haben, daß sich Leben darauf entwickeln konnte und mit dem Leben der Mensch und mit dem Menschen die Vernunft.

Auch hier werden es radioaktive Elemente sein, welche uns Aussagen gestatten, die vordem nicht möglich waren. Aber wir brauchen diese Elemente nicht erst synthetisch aufzubauen; wir begnügen uns mit der Feststellung ihres Vorhandenseins, studieren ihre Eigenschaften und ziehen aus den Eigenschaften unsere Schlüsse.

Es ist hier nicht der Platz, im einzelnen auf die mannigfachen Hypothesen einzugehen, die für die Entstehung unseres Planeten innerhalb des Sonnensystems, dem wir angehören, aufgestellt worden sind. Ob wir uns auf den Boden der Kant - Laplaceschen Theorie stellen, nach der im Urzustande die Körper unseres Sonnensystems eine ungeheure Gasmasse gebildet haben, die sich gleichmäßig bis über die Bahn unseres äußersten Planeten erstreckt hat, und die sich dann durch allmähliche Kontraktion und ihre Folge-

erscheinungen zu unserer Sonne und ihren Planeten verdichtet hat; oder ob wir der neuerdings mehr zur Anerkennung gekommenen Moulton - Chamberlinschen Planetesimal-Hypothese den Vorzug geben, nach der unsere Planeten aus einem unsymmetrischen und ungleichmäßig dichten Spiralnebel entstanden sind, der sich beim nahen Vorübergehen eines fremden Weltkörpers an unserer Sonne aus dieser gebildet hat; ob wir diese oder jene, oder ob wir schließlich irgendeine der anderen bisher aufgestellten kosmologischen Hypothesen für wahrscheinlicher halten: in allen Fällen ergibt sich der Schluß, daß die Erde einmal so heiß gewesen sein muß, daß sich ihre ganze Masse im geschmolzenen Zustande befand, zum mindesten unter den Bedingungen, die an der Erdoberfläche gelten.

Von diesem feurig-flüssigen Zustande hat sich die Erdoberfläche auf ihre heutige Temperatur abgekühlt. Etappen auf diesem Wege sind das Festwerden der Gesteine, später die Bildung flüssigen Wassers. Hier setzt dann die Entstehung der Ozeane und Flüsse ein, und zu einem noch späteren Termin wurden die Bedingungen erreicht, die zur Entwicklung organischen Lebens notwendig sind. Da die Bedingungen, in denen pflanzliches und tierisches Leben möglich ist, recht eng begrenzt sind, so können wir sagen, daß seit den Zeiten, seit denen wir Leben auf unserem Planeten nachweisen, sich die Temperaturverhältnisse nur noch unwesentlich verschoben haben.

Wohl die wichtigste Frage über die Geschichte der Erde ist die Frage nach ihrem Alter. Hier sieht man schon aus den wenigen Bemerkungen, die gemacht wurden, daß es eine Frage der Definition ist, was wir unter dem Alter der Erde verstehen. Auf den Boden wissenschaftlicher Schätzungsmöglichkeiten begeben wir uns erst, wenn wir die Erde als gesonderten und wohldefinierten Teil unseres Sonnensystems

mit ihrer heutigen Masse und ungefähr ihrem heutigen Volumen ins Auge fassen. Daher können wir das Alter frühestens von diesem Zustande an rechnen und es z. B. definieren als die Zeit, die seit Erreichung dieses Zustandes bis heute verflossen ist.

Gehen wir von einer feurig-flüssigen Erdkugel aus, die sich allmählich durch Ausstrahlung in den kalten Weltraum auf die heutige auf der Erdoberfläche herrschende Temperatur abgekühlt hat, dann läßt sich unter Berücksichtigung der geothermischen Tiefenstufe (Temperaturzunahme nach dem Innern der Erde zu) und der mittleren Wärmeleitfähigkeit der Gesteine die Zeit berechnen, die notwendig war, um diese Abkühlung vom feurig-flüssigen Zustande auf den heutigen Zustand zu bewirken. Lord Kelvin, der sich als erster mit diesen Fragen ausführlich beschäftigte, kam nach ursprünglich höheren Werten in seinen letzten Arbeiten auf solche, die zwischen 20 und 40 Millionen Jahren schwankten, wobei er selbst den niedrigeren Wert für den wahrscheinlicheren hielt. Kelvin hat dabei die damals selbstverständliche Annahme gemacht, daß die Erde, abgesehen von der Sonnenstrahlung, keinerlei Wärme empfängt, sondern nur Wärme abgibt. Die Richtigkeit der Kelvinschen Berechnungen wird bestätigt in einer neueren theoretischen Arbeit, die unter Einsetzung einer ursprünglichen Oberflächentemperatur von 1000° und unter Ausschluß anderer wirklicher Wärmeenergien ein Alter von 22 Millionen Jahren für die Erreichung des heutigen Zustandes errechnet*).

Eine andere Definition des Alters der Erde verwendet die Geologie. Sie wählt den Beginn der Entstehung der ozeanischen Gesteinsablagerungen und den Beginn der Kochsalzzufuhr der Flüsse zum Meere. In dieser Zeit war also die äußere

*) L. R. Ingersoll u. O. I. Zobel: Journ. Geology 1911, S. 686, besprochen bei A. Holmes, Geolog. Mag. (6) Bd. 2, S. 106. 1915.

Schale der Erde schon zur Kruste erstarrt, die Weltmeere waren gebildet, die Temperatur war nicht mehr wesentlich höher als die heutige. Das auf diese Weise definierte Alter der Erde muß natürlich niedriger sein als das nach der ersten Weise definierte.

Im Prinzip erscheint auch diese geologische Methode durchaus klar und einwandfrei. Man bestimmt die in einer gegebenen Zeit, etwa einem Jahre, von den Flüssen aus den Gebirgen dem Meere zugeführten unlöslichen Gesteinsfragmente, die sich als sog. Sedimentärschichten am Boden der Ozeane ablagern, und schätzt die Gesamtmenge aller ozeanischen Sedimentschichten, die sich seit Beginn der Ablagerung bis heute gebildet haben. Man kann dann die Zeit berechnen, die nötig war, diese Gesamtmenge der Sedimente abzulagern. Ganz analog ist die Berechnung mittels des Salzgehaltes der Ozeane. Der Gesamtsalzgehalt der Meere, dividiert durch die ihnen jährlich von den Flüssen zugeführte Salzmenge, sollte dann direkt die Zeitdauer des Auslaugungsprozesses, also wiederum das oben definierte Alter der Erde ergeben.

Derartige Schätzungen wurden von einer Reihe amerikanischer und englischer Forscher durchgeführt. Als Mittel ergab sich aus den Sedimentbestimmungen der Wert 90 Millionen Jahre, aus dem Salzgehalt der Ozeane 95 Millionen Jahre. Die Extremwerte lagen zwischen 150 Millionen und 70 Millionen Jahren.

Das aus geologischen Daten berechnete Alter der festen Erdkruste ist also beträchtlich höher als der oben ermittelte Wert von 20 bis 30 Millionen Jahren für die Abkühlungszeit der Erde vom geschmolzenen Zustande auf den heutigen.

Die Widersprüche werden noch größer, wenn man eine dritte Art der Altersschätzung mit den genannten vergleicht: Die Schätzung auf Grund paläontologischer und entwicklungsgeschichtlicher Daten. Die Paläontologie, die

Lehre von den fossilen Resten pflanzlichen und tierischen Lebens in früheren Erdperioden, beginnt ihr Studium der Erde mit der Zeit, in der die klimatischen Verhältnisse die Entwicklung organisierten Lebens möglich machten, wo die Erdtemperatur also mit der heutigen ungefähr übereinstimmen mußte. Sicher ist es also, daß organisches Leben erst zu einer Zeit auftrat, als die Erde schon ein wichtiges Kapitel ihrer Geschichte als Planet hinter sich hatte. Und dennoch schätzen die Paläontologen die Zeit, die vergangen sein muß, um die gewaltige Stufenleiter organischen Lebens auf den heutigen Entwicklungszustand zu bringen auf sehr viel höher als 100 Millionen Jahre ein. Die Sedimente der sog. Kambrischen Erdperiode gehören zu den ältesten, in denen gut erhaltene Versteinerungen aufgefunden wurden. Aber man hat in diesem Kambrium gewisse Krebstiere, sog. Trilobiten gefunden, deren Körper- und Stoffwechselanlagen höher entwickelt waren als die ihrer heute noch lebenden Nachfahren. Der amerikanische Paläontologe Clarke schließt daher durchaus nicht ohne Berechtigung, daß der Weg von den einzelligen Lebewesen bis zu diesen Trilobiten der ältesten uns bekannten Sedimentärschichten ein längerer, vermutlich viel längerer gewesen sein muß als von diesen Trilobiten bis zum Menschen. Die Entwicklungsgeschichte der Lebewesen ist also zum großen Teile vorüber, wenn wir zuerst Kunde von ihr erhalten. (1)*.

Wir sehen also: So viele Wege zur Befragung des Alters der Erde beschritten wurden, so viele Antworten wurden erteilt, und resigniert werden wir uns vielleicht fragen, wenn ein neuer Weg beschritten wird, wird nicht auch dieser Weg ins Ungewisse führen und die Widersprüche um neue vermehren?

*) Die in Klammern stehenden Ziffern verweisen auf die im 5. Kapitel gebrachten Erläuterungen und Zusätze.

Unser Thema lautet, was lehrt uns die Radioaktivität über die Geschichte unserer Erde. Auch jener neue Zweig der exakten Naturwissenschaft beansprucht, die Mittel für Altersbestimmungen der festen Erdkruste beschaffen zu können. Aber es handelt sich hier nicht nur um einen neuen Weg zu vielen anderen. Die Aussagen, die wir hier machen können, unterscheiden sich beträchtlich von den bisher gegebenen. Es liegt im Wesen der radioaktiven Prozesse, daß ihre Schlüsse einen sehr viel höheren Grad von exakter Beweiskraft haben als andere. Radioaktive Prozesse sind inneratomistische Vorgänge; sie spielen sich in den sog. Atomkernen ab, und derartige Atomkernprozesse sind von allen äußeren Bedingungen physikalischer oder chemischer Natur völlig unbeeinflußbar. Nernst hat berechnet, daß zur willkürlichen Hervorbringung oder Beeinflussung radioaktiver Umwandlungen Temperaturen von 10 000 Millionen Grad erforderlich wären; das sind Temperaturen, die auch im Innern der heißesten Fixsterne nie auch nur annähernd erreicht werden. Mit einer fast apodiktischen Sicherheit können wir daher sagen, daß die radioaktiven Prozesse sich in früheren Perioden unserer Erdgeschichte nach genau denselben Gesetzen und mit genau derselben Geschwindigkeit abgespielt haben, wie heute.

Wenn wir daher die Gesamtwirkung radioaktiver Prozesse in unserer festen Erdkruste quantitativ bestimmen können, und die Geschwindigkeit kennen, mit der diese Prozesse verlaufen, dann läßt sich die Dauer dieser Geschehnisse, also das Alter der festen Erdkruste, nicht nur schätzen, sondern mit großer Genauigkeit und an vielen Einzelbeispielen kontrollierbar ablesen.

Mit wenig Worten wollen wir jetzt auf diejenigen radioaktiven Erscheinungen eingehen, deren Auswertung für die Geschichte der Erde von Bedeutung ist.

Die in der Natur in Uran- und Thormineralien ziemlich weit verbreitet vorkommenden und seit lange bekannten chemischen Elemente Uran und Thor sind die Anfangsglieder der großen radioaktiven Umwandlungsreihen, die — mit Ausnahme der sehr schwach aktiven Elemente Kalium und Rubidium — alle bekannten Radioelemente einschließen. Durch stufenweisen, nach festen Gesetzen geregelten Zerfall entsteht aus dem Uran z. B. das Radium, aus dem Radium die Radiumemanation, dann über eine Reihe von Zwischengliedern das Polonium und schließlich als Endprodukt der Reihe das Uranblei, eine Bleisorte, die sich chemisch in nichts von unserem gewöhnlichen Blei unterscheidet. Ganz analog entsteht aus dem Thorium über eine Reihe von Zwischenprodukten, von denen das Mesothor und Radiothor erwähnt seien, das Endprodukt der Reihe, das Thorblei, in seinen chemischen Reaktionen wiederum vom gewöhnlichen Blei nicht unterscheidbar.

Eine Begleiterscheinung dieser allmählichen Umwandlungsprozesse ist die Emission materieller Teilchen oder Strahlen, von denen uns hier die sog. α -Strahlen besonders interessieren. Die α -Strahlen sind positiv geladene Heliumatome, die bei dem radioaktiven Zerfallsprozeß mit ungeheurer Geschwindigkeit aus dem Atom herausgeschleudert werden, aber ihre Geschwindigkeit beim Durchdringen durch Materie sehr schnell einbüßen. Sie verlieren dabei ihre elektrische Ladung und bleiben als Heliumatome in der nächsten Umgebung der radioaktiven Materie stecken. Die große Bewegungsenergie dieser Teilchen wird bei der Bremsung ganz in Wärme umgewandelt, ähnlich wie ein Geschloß, das in eine Metallplatte eindringt, dort schnell seine Geschwindigkeit verliert, die Einschlagstelle aber auf hohe Temperatur erhitzt.

Die Geschwindigkeit der radioaktiven Abbauprozesse ist ungeheuer langsam. Um auch nur einen Prozent einer gegebenen Menge Uran in Blei zu verwandeln, bedarf es fast

Hundert Millionen Jahren, und beim Thorium ist die entsprechende Zeit noch dreimal größer. (2.)

Die mit den radioaktiven Umwandlungen einhergehenden Vorgänge, also die Bildung von Blei in radioaktiven Mineralien, die Ansammlung von Helium und die bei radioaktiven Prozessen entwickelte Wärme, sie alle können für die Fragen der Erdgeschichte herangezogen werden und erweisen sich von grundlegender Bedeutung. Auf der Ansammlung von Helium und Blei in Mineralien beruhen direkte Methoden zur Altersbestimmung dieser Mineralien, und vor allem die sog. Bleimethode erhebt den Anspruch, die sichersten Werte über das Alter eines Minerals zu geben. Wenn wir das Alter eines Minerals kennen, so kennen wir zumindest das Alter eines Bestandteils der festen Erdkruste, wir kennen in vielen Fällen damit auch das geologische Alter der Gesteins- oder Sedimentschicht, in der das Mineral angetroffen wird (Kapitel 2).

Die Wärmeproduktion gibt uns einen tiefen Einblick in den Wärmehaushalt der Erde und zeigt uns einen Vorgang, der bei der obenerwähnten von Kelvin durchgeführten Berechnung der Abkühlungszeit der Erde auf ihre heutige Temperatur nicht berücksichtigt werden konnte, weil damals die radioaktiven Elemente noch nicht entdeckt waren. Welch großen Betrag diese Wärmeproduktion ausmacht, und wie sehr sie geeignet ist, die von Kelvin berechnete Abkühlungszeit zu verlängern, werden wir weiter unten sehen (Kapitel 3).

Aber noch eine andere Bedeutung kommt der Wärmeproduktion der radioaktiven Substanzen für die Geschichte unserer Erde zu. Es hat den Anschein, daß sie eine ausschlaggebende Rolle bei den großen Gebirgsbildungen spielt, die seit der Bildung der festen Erdkruste von Zeit zu Zeit eingetreten sind, und die die im normalen Verlauf der Erdgeschichte dauernd erfolgende Abtragung der Gebirge wieder rückgängig gemacht haben (Kapitel 4).

Zweites Kapitel.

Das Alter der festen Erdkruste.

Altersbestimmungen aus dem Heliumgehalt.

Die schnellsten α -Strahlen, die wir kennen, können in der Luft bei gewöhnlicher Temperatur und normalem Druck einen Weg von nur $8\frac{1}{2}$ cm zurücklegen; in Mineralien ist die entsprechende Strecke natürlich sehr viel kleiner, sie beträgt nur einige Hundertstel Millimeter. Die α -Teilchen bleiben deshalb, wenn sie ihre Geschwindigkeit und Ladung verloren haben, in kompakten Mineralstücken als Helium stecken, das sich entsprechend dem Gehalt an radioaktiver Substanz allmählich ansammeln muß. In der Tat geschah die Entdeckung des Edelgases Helium auf der Erde durch Ramsay in einem Uranmineral, also einem radioaktiven Mineral, und spätere systematische Untersuchungen haben den sicheren Nachweis erbracht, daß alle radioaktiven Mineralien und nur solche durch einen Gehalt an Helium ausgezeichnet sind.

Kennt man z. B. den genauen Urangehalt eines Uranminerals, so kennt man aus den radioaktiven Zerfallsgesetzen auch die Anzahl der in dem Mineral pro Gramm und Sekunde abgegebenen α -Strahlen oder Heliumatomen. 1 g Uran mit seinen Umwandlungsprodukten emittiert in der Sekunde rund 90 000 Heliumatome; auf das Jahr gerechnet ergibt dies $2,8 \cdot 10^{12}$, also 2,8 Billionen. Diese uns riesengroß erscheinende Zahl von Atomen nimmt nach den Gasgesetzen

bei Atmosphärendruck nur den winzigen Raum von 1 Zehnmilliontel Kubikzentimeter ein. 1 g Uran eines beliebigen Uranminerals liefert also pro Jahr 1 Zehnmilliontel Kubikzentimeter Heliumgas. Diese Heliumproduktion in dem Mineral ist nun im Gange, seitdem das Mineral in der festen Erdkruste auskristallisiert ist. Keine Macht der Welt kann diese Heliumbildung beschleunigen oder verzögern, und wie wir das Alter eines Baumes aus der Anzahl seiner Jahresringe ablesen, so können wir das Alter des Minerals aus der Anzahl seiner Jahresquanten Helium bestimmen. Zur Bildung von 1 ccm Helium pro Gramm Uran bedarf es nach dem oben Dargelegten bereits 10 Millionen Jahre, und wenn wir Mineralien finden, die pro Gramm Uran nicht 1, sondern 20, 30, ja 50 ccm Helium enthalten, so können wir schließen, daß die Heliumproduktion in diesem Mineral 200, 300, ja sogar 500 Millionen Jahre stattgefunden hat. Dabei muß man allerdings dem Zerfall des Urans Rechnung tragen. Dieser Zerfall verläuft aber so langsam, daß eine nennenswerte Korrektur nur für alte Mineralien in Frage kommt. (In 500 Millionen Jahren zerfallen 7% einer gegebenen Uranmenge. Der Uragehalt eines Minerals war also vor 500 Millionen Jahren 7% höher als heute.) (3.)

Bevor einige Zahlenangaben über Altersbestimmungen nach der Heliummethode angeführt seien, wollen wir noch diskutieren, welche Fehlermöglichkeiten vorhanden sind, und wie diese die Bestimmungen des Alters aus dem Heliumgehalt in dem einen oder anderen Sinne fälschen könnten.

Ein Umstand, der das aus dem Heliumgehalt ermittelte Alter des Minerals zu hoch erscheinen ließe, wäre der, daß das Mineral bei seinem Auskristallisieren Helium, etwa aus der Umgebung, aufgenommen hätte. Außer dem durch radioaktiven Zerfall in dem Mineral entstandenen Helium hätten wir also zufällig von außen eingeschlossenes. Dieser

Fall ist nun äußerst unwahrscheinlich, denn die nicht radioaktiven Mineralien und Gesteine enthalten kein Helium, und wo sich einmal geringe Spuren davon nachweisen lassen, läßt sich umgekehrt auf einen geringen Uran- oder Thorgehalt des Minerals schließen. Ein zu hohes Alter wird nach der Heliummethode also bestimmt nicht erhalten.

Viel wahrscheinlicher ist dagegen die Annahme, daß ein Teil des in dem Mineral gebildeten Heliums im Laufe der Jahrtausende aus dem Mineral herausdiffundiert ist. Befindet sich ein solches Mineralstück an der offenen Luft, so ist ein Entweichen von Helium experimentell festgestellt. Beim Pulverisieren verliert es sogar bis zu 30%. Wenn nun auch im kompakten Erdinnern ein Herausschmelzen unwahrscheinlicher ist als an der Oberfläche, so ist hier doch zu sagen, daß die uns zur Verfügung stehenden Mineralien von der Oberfläche stammen, und es ist zweifellos anzunehmen, daß sie dabei einen Teil ihres Heliums verloren haben.

Auch unter der Erdoberfläche können unter gewissen Umständen solche Diffusionen von Helium vorkommen, etwa an Stellen, wo hochoverhitztes Gestein an irgendwelche Spalten oder Hohlräume angrenzt. Die großen, bei manchen amerikanischen und kanadischen Petroleum- und Erdgasquellen auftretenden Heliummengen sind ohne Zweifel auf solche Weise entstanden. Sie sind radioaktiven Ursprungs. Millionen von Jahren haben sie das Helium aus den Gesteinen ihrer Umgebung angesammelt; durch irgendeinen Zufall wird die Spalte oder der Hohlraum mit der Außenwelt in Verbindung gebracht und das Helium entweicht. Es ist daher mit Sicherheit zu erwarten, daß sich diese Heliumquellen an den betreffenden Fundorten allmählich erschöpfen, während neue an anderen Stellen wieder auftreten können.

Wir können also mit Bestimmtheit sagen, daß in den Mineralien nicht mehr, sondern weniger Helium vorhanden ist,

als ihrem wahren Alter entspricht. Die Heliummethode zur Bestimmung des Alters von Mineralien gibt zu niedrige Werte. Für relative Zeitbestimmungen ist die Methode aber sehr brauchbar.

Die folgende Tabelle gibt den Heliumgehalt für eine Anzahl Mineralien aus verschiedenen geologischen Zeitabschnitten und das aus ihrem Heliumgehalt berechnete Alter.

Die Werte der Tabelle zeigen in der Tat einen ziemlich stetigen Gang mit zunehmendem geologischen Alter. Für Gesteine aus den ältesten Sedimenten der Erde ergeben sich Werte bis annähernd 600 Millionen Jahre. Da man annehmen kann, daß in den heliumreichsten Mineralien mindestens die Hälfte des Heliums durch Diffusion nach außen entwichen ist, so dürfte das wahre Alter der betreffenden Mineralien sicher doppelt so hoch sein. Die zuverlässigeren Ergebnisse nach der Bleimethode bestätigen diese Annahme.

Tabelle 1.

Geologischer Zeitabschnitt	Mineral	Helium-Verhältnis	Alter in Millionen Jahren
Pliozän	Zirkon	0,146	1,5
Miozän	„	0,57	5,7
Oligozän	Siderit	0,70	7
Perm	Zirkon	3,80	38
Oberkarbon	Limonit	12,8	128
Devon	Hämatit	11,2	112
Silur	Thorianit	22,6	226
„	„	21,2	212
Ober- Präkambrium	Zirkon	25,0	250
Mittel- „	Sphen	32,9	330
„ „	„	38,2	385
Unter- „	Zirkon	54,3	550
„ „	Sphen	56,1	570

Altersbestimmungen aus dem Bleigehalt.

Es wurde schon erwähnt, daß sich das Uran über eine ganze Reihe von Zwischenstufen allmählich in Blei verwandelt. Dieses Blei ist nicht radioaktiv, es zerfällt nicht weiter, sondern sammelt sich in dem Uranmineral allmählich an. In welcher Form das Uran in dem Mineral vorliegen mag, welche anderen chemischen Elemente anwesend sind, ist für den Umwandlungsprozeß ganz gleichgültig. Es handelt sich ja um einen inneratomistischen Zerfall, dessen Ablauf wir beobachten, aber mit keinem Mittel der Physik oder Chemie beeinflussen können. Eine Begleiterscheinung dieses Abbauprozesses von Uran in Blei ist die Bildung des Heliums, das in Form schnell bewegter α -Strahlen aus den radioaktiven Atomen herausgeschleudert wird. Bei der Bildung eines Bleiatoms aus einem Uranatom werden nacheinander 8 solcher Heliumatome emittiert. Das Atomgewicht des Urans ist 238, das des Heliums ist 4. Wenn 8 Heliumatome abgeschleudert werden, so verringert sich also das Atomgewicht des Urans um $8 \cdot 4 = 32$ Atomgewichtseinheiten, das Atomgewicht des entstehenden Bleis ist also 206. Um zu wissen, wieviel Blei sich aus einer gegebenen Menge Uran in einer bestimmten Zeit bildet, müssen wir also nur die Umwandlungsgeschwindigkeit des Urans kennen, die sich nach radioaktiven Methoden ohne jede hypothetische Annahme ermitteln läßt. Wir finden, daß 1 Tonne, also 1000 kg Uran im Jahre nur etwas mehr als $\frac{1}{10}$ mg, also 1 Zehntausendstel Gramm Blei bildet. (4.) Mit der Kenntnis dieser Zahl und der gesamten Bleimenge, die sich in dem Mineral angesammelt hat, läßt sich also wie vorher bei der Heliummethode die Zeit berechnen, die nötig war, um das gefundene Blei zu bilden; mit anderen Worten, es läßt sich das Alter des Minerals bestimmen.

Wieder müssen wir uns aber fragen — wie bei der Dis-

kussion der Angaben nach der Heliummethode — welche Irrtums- und Fehlermöglichkeiten liegen vor, und in welchem Sinne können sie die Ergebnisse beeinflussen.

Wir fragen zunächst: Kann radioaktiv gebildetes Blei aus dem festen Mineralgefüge in erheblichem Maße entfernt worden sein? Die Antwort lautet in den meisten Fällen verneinend. So lange das Mineral als kristallisiertes Produkt vorliegt, so lange es nicht durch Verwitterung und chemische Umbildung eine wesentliche Gefügeänderung erfahren hat, so lange ist es im höchsten Maße unwahrscheinlich, daß Blei aus dem Mineral, etwa durch Auslaugungsprozesse, verschwunden sein kann. Ganz anders steht es mit einer zweiten Fehlermöglichkeit: Kann nicht schon bei dem Auskristallisieren des Minerals fremdes Blei in dessen Molekülverband eingeschlossen worden sein? Mit anderen Worten: Ist alles Blei, das wir in dem Uranmineral finden, durch Zerfall des Urans entstanden, also radioaktiven Ursprungs, oder findet sich gewöhnliches Blei darunter, das die Altersbestimmung fälscht und zu hohe Werte errechnen läßt? Von vornherein läßt sich darüber nichts aussagen. Wir kennen die Bedingungen nicht, unter denen die Bildung der einzelnen Mineralien vor sich gegangen ist, und können daher den Einschluß von Blei bei der Mineralbildung nicht als unmöglich ablehnen. Erfreulicherweise hilft uns hier die Natur über diese Schwierigkeit hinweg.

Wir haben schon gehört, daß das aus dem Uran vom Atomgewicht 238 durch Abspaltung von 8 Heliumatomen entstandene Blei das Atomgewicht 206 haben muß; das gewöhnliche, in der Natur in großen Mengen vorkommende Blei hat dagegen das Atomgewicht 207,2. Atomgewichtsbestimmungen sind nun ein Zweig der experimentellen Chemie, der in den letzten Jahren, in Deutschland vor allem durch O. Hönigschmid in München, zu großer Vollkommenheit

ausgebildet worden ist. Wenn wir nun in einem Uranmineral das Blei nach chemischen Methoden abscheiden und sein Atomgewicht bestimmen, dann läßt sich sofort erkennen, ob ein durch radioaktiven Zerfall entstandenes Blei oder gewöhnliches Blei vorliegt. Im ersteren Falle finden wir das Atomgewicht 206, im letzteren Fall 207,2. Werden Werte zwischen diesen beiden Grenzen ermittelt, dann kann man den sicheren Schluß ziehen, daß ein Gemisch von sog. Uranblei und gewöhnlichem Blei vorliegt, und aus dem experimentell ermitteltem Wert ergibt sich das Mischungsverhältnis der beiden Bleiarten und damit der genaue Gehalt an Uranblei. Wir haben hier also eine Methode der Altersbestimmung, die auf rein experimentellen Grundlagen beruht; es brauchen keinerlei hypothetische Annahmen gemacht zu werden, und die gefundenen Zahlen können als Absolutwerte innerhalb ziemlich enger Grenzen angesprochen werden.

Die Tabelle 2 zeigt einige Resultate, die mit der hier beschriebenen Bleimethode erzielt worden sind. Die Mineralien stammen von sehr verschiedenen Fundorten und verschiedenen alten geologischen Formationen.

Aus der Tabelle erkennt man, daß die Bleimethode wesentlich höhere Werte für das Alter geologischer Formationen ergibt als die Heliummethode. Aus den weiter oben dargelegten Gründen können diese Werte aber einen größeren Anspruch auf Richtigkeit machen als die niedrigeren, nach der Heliummethode erhaltenen.

Handelt es sich um gut definierte, kristallisierte Mineralien ein und derselben geologischen Formation, so ist die Übereinstimmung in den Resultaten so gut, daß es schwerfällt, an einen irgendwie erheblichen Fehler zu glauben.

In der folgenden Tabelle findet sich eine Zusammenstellung des Gehaltes von Uran und Blei in einer größeren

Tabelle 2.
Altersbestimmungen von Uranmineralien nach der
„Bleimethode“ (**).

Serie	Mineral	Fundort	Blei Uran	Mittleres Alter in Millionen Jahren
I	Uraninit	Glastonbury, Conn., U. S. A.	0,041	Karbon: 335 Millionen Jahre
	„	„	0,042	
	„	„	0,039	
	„	„	0,041	
			Mittel 0,041	
II	Uraninit	Morogoro, Ost- Afrika	0,094*)	Geologisches Alter un- bestimmt. Jedenfalls jünger als IV und VIII, 730 Milli- onen Jahre. *) Atomgewicht des Bleis = 206,05 (Hönig- schmid und Horovitz.
	„	„	0,092	
			Mittel 0,093	
III	Uraninit	Anneröd, Norwegen	0,13	Mittel Präkam- brium: 1050 Milli- onen Jahre. *) Atom- gewicht des Bleis = 206,06 (Hönig- schmid und Hor- vitz.)
	„	„	0,12	
	Annerödrit	„	0,15	
	Uraninit	Elvestad, Norweg.	0,14	
	„	„	0,14	
	„	Skaartorp, Norw.	0,135	
	„	Huggenäskilen, N.	0,13	
			Mittel 0,13	
IV	Zirkon	Nrassi-Bassin	0,17	Geologisches Alter unbekannt: Jeden- falls jünger als VIII. 1150 Millionen Jahre.
	„	Mozambique	0,15	
	„	Monapo-Fluß	0,15	
	„	Mozambique	0,15	
			Mittel 0,15	
V	Fergusonit	Ytterby, Schweden	0,17	Mittel-Präkam- brium: 1150 Milli- onen Jahre.
	Gadolinit	„	0,15	
			Mittel 0,16	
VI	Uraninit	Villeneuve, Quebec. Ontario	0,17	Mittel-Präkam- brium: 1250 Milli- onen Jahre.
VII	Cleveit	Arendal, Norwegen	0,19*)	Mittel-Präkam- brium: 1350 Milli- onen Jahre. *) Atom- gewicht des Bleis = 206,08 (Richards und Wadsworth).
	Uraninit	„	0,18	
	„	„	0,17	
	„	„	0,17	
			Mittel 0,18	
	Xenotim	Naresto „	0,21	
VIII	Zirkon	Mozambique	0,21	Unter-Präkambrium: 1600 Millionen Jahre.

(**) Gekürzt und etwas anders berechnet entnommen aus R. W. Lawson, Naturw. Bd. 5.
S. 456. 1917.

Anzahl kristallisierter norwegischer Uranmineralien, die als Bröggerite bezeichnet werden. Sie stammen aus gleicher geologischer Fundstätte, haben also vermutlich dasselbe Alter. In der Tat ist das Verhältnis des Urans zum Blei in den vielen untersuchten Proben bemerkenswert konstant und bestätigt die Vermutung gleicher Entstehungszeit. Die Analysen sind teils in Amerika, teils in Norwegen ausgeführt worden*).

Tabelle 3.

Laufende Nr.	Uran	Blei	Blei Uran	Alter im Durchschnitt
1	69,30	8,77	0,118	} 950 Millionen Jahre
2	66,14	9,38	0,132	
3	66,48	9,39	0,131	
4	66,34	8,92	0,125	
5	68,10	8,8	0,120	
6	63,36	8,88	0,130	
7	64,39	8,93	0,129	
8	66,14	9,25	0,130	
9	66,13	9,27	0,130	
10	66,58	9,23	0,129	
11	66,34	9,25	0,130	
12	61,67	8,64	0,130	

Atomgewichtsbestimmungen des Bleis wurden nur an einer Durchschnittsprobe durchgeführt. Die Bestimmung ergab 90 % Uranblei und 10 % gewöhnliches Blei.

Nimmt man diesen Wert für alle untersuchten Proben als richtig an, dann berechnet sich hieraus ein Alter der Bröggerite von ungefähr 950 Millionen Jahren; bemerkenswert ist, daß die den geringsten Bleiwert zeigenden Mineralien 1 und 5 den höchsten Urangehalt aufweisen. Diese Mineralproben waren also vermutlich die reinsten, und daher war wohl auch das Blei noch reineres Uranblei als das der Durchschnitts-

*) Entnommen aus E. Gleditsch, Bull. Soc. Chim (4) Bd. 31, S. 353. 1922.

proben; es dürfte aus 95 oder noch mehr Prozenten Uranblei bestanden haben. Trifft dies zu, dann ergibt sich auch für diese Proben, trotz des geringeren Bleigehaltes, derselbe Alterswert wie für die anderen Proben, und die Übereinstimmung wird vorzüglich.

Wir haben bisher nur von Uranmineralien gesprochen und die Bedingungen diskutiert, unter denen man in solchen Mineralien einwandfrei Altersbestimmungen vornehmen kann. Nun ist außer dem chemischen Element Uran das Element Thorium ebenfalls als radioaktiv bekannt; auch das Thorium baut sich unter stufenweiser Emission von Heliumatomen allmählich in Blei um, das nicht mehr radioaktiv ist und sich daher in dem Mineral ansammelt. Auch bei dem Blei aus Thorium hat die Natur dafür gesorgt, daß man es von dem gewöhnlichen Blei unterscheiden kann. Das Thorblei hat das Atomgewicht 208 gegenüber dem von 207,2 für gewöhnliches Blei. Im Prinzip ist daher die Methode der Altersbestimmungen für Thormineralien genau die gleiche wie für Uranmineralien.

In der Praxis sind die Bestimmungen aber viel schwerer durchzuführen und häufig weniger einwandfrei. Die Gründe dafür liegen nicht in der Methode, sondern sind rein äußerlicher Art. Das Thorium wandelt sich dreimal langsamer um als das Uran; die aus Thorium gebildeten Bleimengen sind daher geringer als die in gleichen Zeiten gebildeten Bleimengen aus Uranmineralien und daher schwerer zu bestimmen (5.) Hinzu kommt, daß fast alle Thormineralien auch Uran enthalten, also Blei sich sowohl aus dem Thor, als aus dem Uran bildet. Das Atomgewicht des Thorbleis ist 208, das des Uranbleis 206. Wenn beide Bleisorten entstehen, dann bekommt man Mischungen mit einem zwischen diesen Grenzen liegenden Atomgewicht und kann dann nicht mehr sicher entscheiden, ob in dem Mineral gewöhnliches Blei

vorhanden war oder nicht. Zudem liegen viele, und zwar gerade die uranarmen Thormineralien, nicht in kristallisiertem, sondern im amorphen Zustand vor; sie sind sekundären Ursprungs, durch Umwandlungsprozesse aus anderen Mineralien erst viel später als das umgebende Gestein entstanden und können daher für Altersbestimmungen geologischer Perioden nicht herangezogen werden. Schließlich kommt hinzu, daß bei solchen amorphen, oberflächenreichen Mineralien Auslaugungsprozesse eine große Rolle spielen können. Ist dies der Fall, dann wird das radioaktiv gebildete Blei und natürlich auch das Helium fortgeführt; es wird für das Mineral ein viel niedrigeres Alter vorgetäuscht, als ihm in Wahrheit zukommt (6).

Immerhin gibt es auch einwandfreie, gut kristallisierte Thormineralien, die sich für Altersbestimmungen mit Vorteil heranziehen lassen, und unter gewissen Bedingungen gelingt dies auch für Mineralien, die sowohl Uran als Thor enthalten.

So wurden in jüngster Zeit von Ellsworth*) in Kanada eine größere Anzahl Altersbestimmungen an geologisch gut definierten sowohl uran- als thorhaltigen Mineralien durchgeführt und für geologisch gleiche Fundorte ausgezeichnete Übereinstimmung in den Resultaten erzielt. In der Tab. 4 ist als Beispiel eine Zusammenstellung der Ergebnisse an einer Reihe kanadischer präkambrischer Uraninite wiedergegeben. Die Altersberechnungen erfolgten unter Berücksichtigung des Uran- und Thorzerfalls (5).

Diese hier gefundenen Werte für das Alter des Präkambriums stimmen mit den Werten der Tab. 2 und 3 recht gut überein.

Es kann kaum einem Zweifel unterliegen, daß die Altersbestimmungen nach der Bleimethode, wenn das Material gut

*) H. V. Ellsworth, Americ. Journ. Science (5) Bd. 9, S. 127. 1925.

Tabelle 4
Alter präkambrischer Uraninite.

Fundort	U	Th	Pb	Pb	Alter, auf Uranzerfall korrigiert
				$\frac{U+0,384}{Th}$	
Villeneuve, Quebec	64,74	6,41	10,46	0,156	1189 Millionen Jahre
Parry Sound, Ontario	69,19	2,83	10,83	0,154	1179 „ „
Parry Sound, „	66,12	2,94	9,76	0,145	1115 „ „
Butt township, „	66,02	1,08	9,82	0,148	1130 „ „
Butt township, „	64,24	0,71	9,62	0,149	1143 „ „
Cardiff township, „	55,26	11,92	10,25	0,171	1299 „ „

ausgesucht und geologisch eindeutig definiert ist, wenn außerdem wirklich genaue Analysen des Urans, des Bleis und gegebenenfalls des Thors vorliegen, an Zuverlässigkeit von keiner anderen Methode geologischer Altersbestimmung erreicht wird. Für das Präkambrium muß man also sicher ein Alter von über 1000 Millionen Jahren annehmen, und der oben angegebene Wert von 1600 Millionen für einen Zirkon aus dem ältesten Ablagerungen des Präkambriums dürfte dann der Wahrheit wohl auch recht nahe kommen.

Der Zirkon, dessen hoher Bleigehalt ein derartig hohes Alter ergibt, findet sich in einem Eruptivgestein, das durch „Intrusion“ in die Sedimente der präkambrischen Epoche eingedrungen ist. Da die Sedimente ozeanische Gesteinsablagerungen sind, so gibt die Zahl 1600 Millionen Jahre eine untere Grenze für das Alter der Ozeane; eine untere Grenze, weil die Sedimente ja älter sein müssen als das Eruptivgestein, das in sie eingedrungen ist, und der Ozean noch älter sein muß als die Sedimente, die sich in diesem erst gebildet haben können (7).

Wir haben, bevor wir auf die radioaktiven Methoden für die Altersbestimmungen geologischer Zeit zu sprechen kamen, kurz die anderen Wege angegeben, auf denen man Aussagen über die Geschichte unserer Erde zu machen gesucht hat. Die Angaben von Lord Kelvin über die Ab-

kühlungszeit der heißen Erdkugel müssen ausscheiden, weil ihm die Wärmewirkung radioaktiver Stoffe in der Erde nicht bekannt war, weil er also diesen wichtigen Faktor in seine Berechnungen nicht aufnehmen konnte. Ziehen wir nun die anderen Methoden heran, die rein geologischen und die paläontologischen, so sehen wir, daß die Resultate, zu denen wir nach der Bleimethode gelangt sind, durchaus verträglich sind mit den langen Zeitläufen, die die Paläontologen für die Entwicklung der Stufenleiter organisierten Lebens beanspruchen müssen; sie stehen aber in Widerspruch zu den 100, höchstens 150 Millionen Jahren, die man aus dem Salzgehalt der Ozeane und der Dicke der Sedimentschichten errechnet hat.

Diese Bestimmungen sind nun in den letzten Jahren einer eingehenden Revision unterzogen worden, und das Ergebnis war, daß sie, auch vom rein geologischen Standpunkt aus beurteilt, vermutlich viel zu niedrig sind.

Eine ganze Reihe neu beobachteter oder mit mehr Kritik beurteilter Tatsachen wirken alle in der Richtung eines höheren Alters, und zwar sowohl für die Altersbestimmungen aus der Mächtigkeit der Sedimentschichten als für die aus dem Salzgehalt der Ozeane. Ohne hier auf Einzelheiten einzugehen, sei nur als Ergebnis mitgeteilt, daß eine Erhöhung der früher angegebenen geologischen Daten (Bildungsgeschwindigkeit und Mächtigkeit der Sedimente, Salzgehalt der Ozeane) auf das 10, ja 20fache, mit den tatsächlichen geologischen Erfahrungen nicht im Widerspruch steht*) (8, 11).

Wir sehen somit, daß die radioaktiven Erscheinungen und Umwandlungsprozesse ihre große Bedeutung nicht nur darin haben, uns absolute Methoden geologischer Zeitbestimmungen an die Hand zu geben, sie wirken auch befruchtend und an-

*) J. W. Gregory: Nature Bd. 108, S. 283, 1921,

regend auf andere Gebiete der Erdgeschichte; sie helfen dabei, irrtümliche Hypothesen zu berichtigen und regen zu neuen Untersuchungen an.

Altersschätzungen aus pleochroitischen Höfen.

Ganz kurz sei noch auf eine dritte Methode der Schätzung des Alters von Mineralien eingegangen. Sie macht nicht den Anspruch, wirklich genaue Zeitdaten zu geben; sie ist aber doch für die Geschichte der Erdoberfläche von Interesse und gestattet Aussagen, die man auf anderem Wege nicht machen kann.

In Dünnschliffen mancher Mineralien (Glimmerarten, Turmalinen) beobachtet man zuweilen unter dem Mikroskop kleine gefärbte kreisrunde Gebilde, sog. Höfe oder Halos, die man wegen gewisser optischer Eigenschaften als „pleochroitische Höfe“ bezeichnet (sie zeigen im polarisierten Licht die Eigenschaften des „Pleochroismus“).

Die Aufklärung über den Ursprung dieser den Geologen seit langem bekannten Erscheinung geschah gleichzeitig von Mügge*) und von Joly**): Es handelt sich um die Verfärbung des Minerals durch die α -Strahlen winziger radioaktiver Einschlüsse. Ist dieser Einschluß genügend klein, dann ist die Ausbildung des Hofes im Mineral genau kugelförmig, im Spaltungsstück konzentrisch, und zwar lassen sich häufig verschieden stark gefärbte kreisrunde Zonen erkennen. Der Radius der äußersten Zone beträgt für uranhaltige Kerne im Glimmer 0,033 mm, für thorhaltige Kerne maximal 0,040 mm. Diese Radien entsprechen den Reichweiten der schnellsten α -Strahlen der Uran- bzw. Thorreihe,

*) B. Mügge: Zentralbl. f. Min. 1907, S. 397; 1909, S. 65, 113, 142.

***) J. Joly: Phil Mag. (6) Bd. 13, S. 381. 1907; Bd. 19, S. 327. 630. 1910.

die Radien der inneren Ringe den Reichweiten der langsameren Strahlen. Unter der Reichweite ist hier also die Strecke zu verstehen, längs welcher die Strahlen eine Verfärbung in dem Mineral hervorrufen.

In neuerer Zeit sind von Gudden und Schilling*) auch am sog. Wölsendorfer Flußspat derartige Höfe vorgefunden worden, und zwar zeigen diese die konzentrischen Zonen mit einer derartigen Schärfe, daß sich daraus die Reichweiten aller α -Strahlen der Uranreihe mit großer Genauigkeit bestimmen ließen, die kurzen Reichweiten des Uran I und Uran II sogar sicherer als

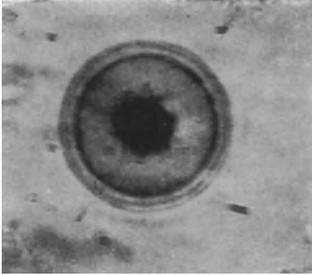


Abb. 1.

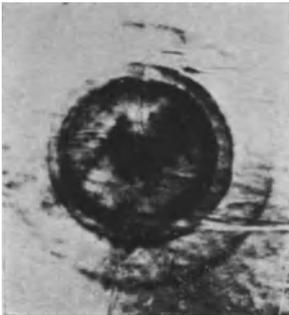


Abb. 2.

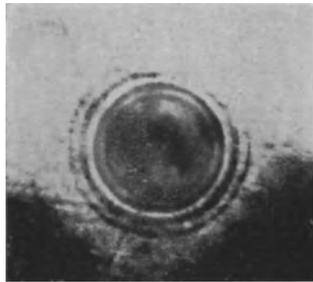


Abb. 3.

nach den bisherigen Methoden. In den Abbildungen 1—3 sind Mikrophotographien derartiger Höfe in mehrhundertfacher Vergrößerung wiedergegeben. Sie zeigen Höfe in verschiedener Ausbildung, aber alle sind durch große Schärfe ausgezeichnet.

Es ist klar, daß die Stärke der Verfärbung in diesen Höfen von der Anzahl der α -Teilchen abhängt, die aus dem Körnchen

*) B. Gudden: Z. f. Phys. Bd. 26, S. 110. 1924.

radioaktiver Substanz in das umgebende Mineral eingetreten sind. Die Verfärbung ist um so größer, je länger die Dauer der Einwirkung war, je älter also das Mineral ist.

Wenn man nun experimentell ermittelt, wie viele α -Teilchen in dem betreffenden Mineral eine der beobachteten Schwärzung entsprechende Verfärbung hervorrufen, dann läßt sich unter einer plausiblen Annahme über den Urangehalt des Einsprenglings die Zeit bestimmen, die nötig war, die Schwärzung zu bewirken, es läßt sich das Alter des Minerals bestimmen.

Joly und Rutherford*) haben solche Untersuchungen vorgenommen, und zwar benutzten sie dazu eine dem Unterdevon angehörige Glimmerart, bei der vielfach solche Höfe vorkommen. In Spaltungsstückchen dieses Glimmers wurden durch Bestrahlung mit konzentrierten radioaktiven Substanzen in kurzer Zeit die Verfärbungen künstlich hervorgerufen, die in der Natur durch minimale Mengen radioaktiver Substanz während geologischer Zeitdauern entstanden sind. Die künstliche Verfärbung konnte so geleitet werden, daß die Farbtiefe die gleiche wurde, wie die in den natürlichen Höfen. Es wurde nun genau bestimmt, wie viele α -Strahlen zur Hervorbringung der Verfärbung notwendig waren. Kennt man nun noch die Anzahl der Strahlen, die in einer gegebenen Zeit, etwa in einem Jahre, aus dem radioaktiven Einsprengling in den umgebenden Glimmer hineingefeuert wurden, so weiß man, wie lange der Prozeß vor sich gegangen sein muß, um die beobachtete Färbung hervorzurufen: Mit anderen Worten, man erfährt das Alter des betreffenden Glimmers. Als höchster Wert für den Glimmer aus dem genannten geologischen Zeitabschnitt, dem Unterdevon, ergab sich nach dieser Methode ein Alter von 470 Millionen Jahren. Das Devon ist eine Sedimentärschicht, die älter ist als die Schich-

*) J. Joly und E. Rutherford: Phil. Mag. Bd. 25, S. 644. 1913.

ten des Steinkohlenzeitalters, aber wesentlich jünger als die frühesten Sedimentärschichten der festen Erdkruste. Ein Vergleich dieser Altersbestimmung mit den Bestimmungen geologisch gleich alter Schichten nach der Bleimethode ergibt eine befriedigende Übereinstimmung (9).

An sich kann die Methode der Färbung pleochroitischer Höfe keinen großen Anspruch auf Genauigkeit machen, denn die Schätzung des mikroskopisch kleinen Mineraleinsprenglings auf Gehalt an radioaktiver Substanz ist mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. Aber etwas läßt sich aus diesen Höfen mit Sicherheit schließen. Ein Mineral, das mit seinem winzig kleinen radioaktiven Einsprengling derartig deutliche pleochroitische Höfe aufweist, wie wir sie oben in einigen Bildern stark vergrößert gesehen haben, kann während der mehreren hundert Millionen Jahre, die es sicherlich in der festen Erdkruste gelagert hat, niemals wesentlich höheren Temperaturen ausgesetzt gewesen sein, als wir sie heute an der Erdoberfläche beobachten: Ein auch nur kurzes Erhitzen auf ein paar hundert Grad bleicht nämlich die pleochroitischen Höfe aus, sie verschwinden, und zur Wiederhervorbringung ist wieder die ungeheure Zeitspanne nötig, die oben an dem Beispiel des Glimmers aus der Devonperiode ermittelt wurde.

Es hat für den Naturforscher fast etwas erschütterndes, wenn er sieht, wie sich in den winzigen, nur mit dem Mikroskop erkennbaren Kreislein der pleochroitischen Höfe ein über zahllose Jahrmillionen erstreckender radioaktiver Zerfallsprozeß mit absoluter Genauigkeit aufgezeichnet hat (10, 11).

Drittes Kapitel.

Der Wärmehaushalt der Erde.

Wir wenden uns jetzt zu einem Gebiete, das ebenfalls mit der Entwicklungsgeschichte unserer Erde zusammenhängt, nämlich zu der Frage nach der Wärmeverteilung innerhalb unserer festen Erdkruste, nach ihrem sog. Wärmehaushalt. Geht man von der Erdoberfläche allmählich nach der Tiefe, so beobachtet man eine ständige Temperaturzunahme, und zwar beträgt diese für je 30 m etwa 1° C; man nennt diesen Temperaturgradienten die „geothermische Tiefenstufe“. In 1 km Tiefe ist die Temperatur also schon 30° höher als an der Oberfläche. Wieweit und in welchem Maße sich diese Temperatursteigerung nach tieferen Schichten fortsetzt, läßt sich direkt natürlich nicht bestimmen, denn das tiefste Bohrloch der Erde ist nur etwas über 2 km tief. Aber sicher herrschen in der Tiefe wesentlich höhere Temperaturen als an der Oberfläche. Der Vulkanismus zeigt uns ja in drastischer Weise, daß diese Temperaturen den Schmelzpunkt der Gesteine erreichen, Temperaturen die unter den gegebenen Druckbedingungen etwa $1200-1400^{\circ}$ betragen werden. Es war auf Grund der Daten dieses Temperaturgradienten von der Oberfläche der Erde nach dem Innern und auf Grund experimentell ermittelter Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine, daß Lord Kelvin zu dem schon mehrfach angeführten Wert für die Abkühlungszeit der Erde vom feurig-flüssigen auf den heutigen Zustand gelangte.

Hier sind es nun wieder die radioaktiven Substanzen, die uns eine Erklärung dafür geben, daß der Wärmegehalt der äußeren Erdkruste heute noch viel beträchtlicher ist, als man aus dem hohen Alter der Erde erwarten dürfte. Die Erklärung ist die: Wir haben in den radioaktiven Substanzen eine ständige Wärmequelle, die den durch Ausstrahlung bedingten Verlust in den kalten Weltraum in weitgehendem Maße kompensiert.

Inwieweit diese Behauptung zu Recht besteht, wollen wir etwas näher erörtern. Die radioaktiven Elemente sind auf der Erde fast überall verbreitet. Kennt man die Menge, in der sie vorkommen, so läßt sich aus den bekannten Daten der Energieentwicklung bei radioaktiven Umwandlungen der Betrag an Wärme berechnen, der von den Radioelementen der festen Erdkruste zugeführt wird.

Eine große Anzahl von Untersuchungen typischer Gesteinsarten von allen möglichen Teilen der Erde hat das Resultat ergeben, daß alle untersuchten Gesteine sowohl Uran als auch Thorium enthalten. Im allgemeinen sind die Eruptivgesteine stärker aktiv als die Sedimente, und auch innerhalb dieser Hauptgruppen finden sich noch Abstufungen.

Tabelle 5.

Eruptivgesteine	Gehalt an Radium	Gehalt an Uran	Sedimentär- gesteine	Gehalt an Radium	Gehalt an Uran
Saure Gesteine (Granit u. a.)	$2,9 \cdot 10^{-12}g$	$8,7 \cdot 10^{-6}g$	Tone	$1,5 \cdot 10^{-12}g$	$4,5 \cdot 10^{-6}g$
Zwischenformen (Syenit, Porphy, Trachyt)	$2,0 \cdot 10^{-12}g$	$6 \cdot 10^{-6}g$	Sand- steine	$1,4 \cdot 10^{-12}g$	$4,2 \cdot 10^{-6}g$
Basische Gesteine (Basalt, Diabas, Gabbro)	$1,0 \cdot 10^{-12}g$	$3 \cdot 10^{-6}g$	Kalk	$0,9 \cdot 10^{-12}g$	$2,7 \cdot 10^{-6}g$

In der Tab. 5 ist der Radiumgehalt und der sich durch Multiplikation mit $3 \cdot 10^6$ ergebende Urangehalt für die wichtigsten Gesteinsarten zusammengestellt, immer auf 1 g Gestein bezogen (Holmes).

Die Zahlen sind Durchschnittswerte für eine sehr große Anzahl von Gesteinen der verschiedensten Teile der Erde.

Der höhere Durchschnittswert der Eruptivgesteine rührt wohl zum Teil daher, daß bestimmte Gesteinsarten, wie Granite, Quarzporphyre u. a. durch einen besonders hohen Radiumgehalt ausgezeichnet sind, der das Mittel hebt; zum anderen Teil wird bei der Entstehung der Sedimente ein Teil des Uranradiums im Meere verbleiben, diesem seinen tatsächlich gefundenen Radiumgehalt erteilen und die Aktivität der Sedimente herabsetzen.

Für den Gehalt an Thorium liegen nicht so zahlreiche Messungen vor, sie sind auch schwerer auszuführen. Sie ergeben aber ein dem Radiumvorkommen ähnliches Bild für die Verteilung. Die Tab. 6 bringt dies zum Ausdruck (Holmes).

Tabelle 6 (12).

Eruptivgesteine	Thorgehalt pro g Substanz	Sedimentgesteine	Thorgehalt pro g Substanz
Saure Gesteine	$29 \cdot 10^{-6}$ g	Tone	$11 \cdot 10^{-6}$ g
Zwischenformen	$17 \cdot 10^{-6}$ g	Sandsteine	$5 \cdot 10^{-6}$ g
Basische Gesteine	$5 \cdot 10^{-6}$ g	Kalk und Dolomit	$1 \cdot 10^{-6}$ g

Aus dem oben angegebenen mittleren Gehalt der festen Erdkruste an radioaktiven Stoffen läßt sich nun leicht die Wärme berechnen, die der Erde durch die radioaktiven Prozesse dauernd zugeführt wird, und man kann diese Zufuhr mit dem Wärmeverlust vergleichen, den die Erdoberfläche durch Ausstrahlung in den Weltenraum erleidet. Macht man die Annahme, daß der Urangehalt der Gesteine so, wie wir ihn in den Eruptivgesteinen der Erdoberfläche ermittelt

haben, sich gleichmäßig in der ganzen Erdkugel vorfindet, so finden wir eine Gesamtmenge, die 150 mal größer ist als der Betrag, der notwendig ist, den gesamten Strahlungsverlust der Erde nach dem Weltraum zu kompensieren. Führt man dieselbe Rechnung für das Thorium aus, nimmt man also an, daß das Thorium, in der Konzentration, wie wir es in den Oberflächenschichten vorfinden, sich durch die ganze Masse der Erde verteilt, so erhalten wir 130 mal mehr Wärme, als nach außen abgegeben wird (13).

Diese Resultate sind höchst bemerkenswert. Sie besagen, daß der mittlere Uran- und Thorgehalt, so wie er in der äußeren Erdkruste experimentell ermittelt wurde, sich keinesfalls sehr tief in das Innere der Erde erstrecken kann. Statt einer allmählichen Abkühlung ergäbe sich sonst eine Erwärmung der Erde, und zwar wäre diese Erwärmung so groß, daß die Erde mit Riesenschritten dem feurig-flüssigen Zustande entgegenzueilen müßte; schon in einer Million Jahren würde ihre Temperatur um etwa 40° ansteigen. Da eine solche Erwärmung sicher nicht statthat, sind wir zu dem Schluß gezwungen, daß die radioaktiven Substanzen sich nur in einer dünnen Rindenschicht der Erdkruste vorfinden, und zwar genügt eine Schicht von nur 16 km Tiefe, um die Erde im Temperaturgleichgewicht zu halten, die Ausstrahlung also gerade zu kompensieren (14).

Da die Geschwindigkeit radioaktiver Prozesse von Temperatur und Druck völlig unabhängig ist, kann man nicht etwa an eine Verzögerung oder Umkehr der radioaktiven Umwandlungen in tieferen Erdschichten denken; für das Vorhandensein größerer Uran- und Thormengen, als der eben berechneten Schichtdicke von 16 km entspricht, ist also kein Platz.

Dagegen ist es in hohem Maße unwahrscheinlich, daß das Uran und Thor wirklich etwa auf dieser 16 km Zone gleich-

mäßig verteilt seien. Eine ganze Reihe von Tatsachen spricht vielmehr gegen eine solche Annahme. Aus der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine und der Wärmeentwicklung der radioaktiven Substanzen läßt sich berechnen, daß an der Sohle einer gleichmäßigen 16 km tiefen Schicht die Temperatur nur etwa 250° höher sein könnte als an der Oberfläche. Für die noch tieferen Schichten bliebe also nur die aus dem Erdinnern stammende Wärmeströmung wirksam, die aber nicht hinreichen würde, um die dort tatsächlich vorhandenen höheren Temperaturen zu erhalten. Hinzu kommt, daß die aus den tieferen Schichten der Erdkruste durch vulkanische Tätigkeit nach außen gelangenden Basaltlaven alle einen gewissen, wenn auch kleinen, Gehalt an radioaktiven Substanzen aufweisen*). Um also die ermittelte Menge von Uran und Thor mit den Tatsachen des Vulkanismus und dem Radiumgehalt vulkanischer Laven in Einklang zu bringen, muß man annehmen, daß die Konzentration der Radioelemente in den äußeren Erdschichten keine konstante ist, sondern nach der Tiefe zu allmählich abnimmt, sich dafür aber tiefer ins Erdinnere versteckt. Dies stimmt auch mit der Erfahrung, daß die stark aktiven (sauren) Gesteine auf die äußersten kontinentalen Schichten beschränkt sind und nach der Tiefe zu bald von solchen abgelöst werden, deren Radiumgehalt geringer ist (15).

Ein genaues Gesetz der Verteilung der radioaktiven Substanzen läßt sich natürlich nicht angeben; man kommt den beobachteten Erscheinungen rechnerisch am nächsten, wenn man eine sog. exponentiale Abnahme des Gehaltes mit der Tiefe einsetzt; der amerikanische Forscher Jeffreys berechnet die Dicke, in der der Gehalt an radioaktiven Stoffen auf die Hälfte abgenommen hat, auf ca. 9 km. In 2×9 km wären nur noch $\frac{1}{4}$ vorhanden, in 3×9 km noch $\frac{1}{8}$ usw.

*) J. Joly: Phil. Mag. Bd. 48, S. 819. 1924.

Man gelangt auf diese Weise zu Temperaturen in den tieferen Schichten der Erdkruste, die mit den Forderungen des Vulkanismus in keinem Widerspruch mehr stehen, und zwar vor allem dann, wenn man außer der radiothermischen Energie noch einen gewissen Prozentsatz ursprünglicher Wärmeenergie hinzunimmt. Wir verstehen hierunter den aus dem noch heißen Erdinnern durch Wärmeleitung nach außen gelangenden Anteil an Wärmeenergie.

Daß die Erde sich an ihrer Oberfläche von einem ursprünglich feurig-flüssigen auf den heutigen Zustand allmählich abgekühlt haben muß, darüber besteht kein Zweifel. Es herrscht auch kein Zweifel darüber, daß durch die dauernde Wärmezufuhr radioaktiver Elemente diese Abkühlung langsamer verlaufen sein muß, als man früher annahm. Wie groß die Verlangsamung ist, läßt sich leicht an einem Beispiel zeigen: Unter der Voraussetzung, daß drei Viertel des an der Erdoberfläche beobachteten Temperaturgradienten — also der Zunahme der Wärme mit der Tiefe — von den radioaktiven Elementen und ein Viertel von dem normalen Abkühlungsprozeß der Erde herrührt, haben die amerikanischen Forscher Ingersoll und Zobel die Zeit berechnet, die notwendig war, um die Erde von einer ursprünglichen Oberflächentemperatur von 1000° auf die heutige Temperatur abzukühlen. Sie finden 1600 Millionen Jahre. Da nun aber vor 1600 Millionen Jahren die Erde sich wahrscheinlich schon in einem dem heutigen sehr nahe kommenden Temperaturzustande befand, muß man die Zeit, wo ihre Oberflächentemperatur noch 1000° war, weiter zurück verlegen und kommt dadurch zu einer noch stärkeren Beteiligung der radioaktiven Energie, als in dem obigen Beispiel angenommen wurde. Auf alle Fälle sehen wir, daß wir in den radioaktiven Elementen eine Wärmequelle zur Verfügung haben, die mehr als ausreicht, um die weiter oben für das Alter der festen Erd-

kruste ermittelten Werte auch vom wärmetheoretischen Standpunkt aus befriedigend zu erklären.

Das Bild, das wir uns jetzt von dem Wärmezustand unserer Erde machen können, ist etwa folgendes. In der äußersten Oberfläche und in der Atmosphäre sind die Temperaturverhältnisse unseres Planeten im wesentlichen durch die Sonnenwirkung bedingt. Am Tage wird Wärmeenergie eingestrahlt, in der Nacht ausgestrahlt. Ein Wärmefluß nach dem Innern der Erde, etwa im heißen Sommer, findet nicht statt; dazu ist die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine, die die Oberfläche bilden, zu gering. In 10 m Tiefe herrscht schon eine von der Sonnenstrahlung unabhängige Temperatur, sie ist im Sommer und im Winter innerhalb $0,1^\circ$ konstant. Zu dieser durch Ein- und Ausstrahlung der Sonnenenergie geregelten Wärmebilanz der Oberfläche addiert sich ein Wärmestrom aus dem Innern der Erde, dessen Betrag sich aus dem experimentell festgestellten Temperaturgradienten, der geothermischen Tiefenstufe, ergibt. Diese geothermische Tiefenstufe wird zum weitaus größten Teil von der Wärmeproduktion der radioaktiven Substanzen in den oberen Schichten der festen Erdkruste aufrechterhalten. Aus dem heißen Erdinnern kann nur ein geringer Anteil des Wärmeflusses stammen wegen der außerordentlich geringen Wärmeleitfähigkeit der Gesteine. Der Erdkern hat heute noch praktisch dieselbe Temperatur wie unmittelbar nach dem Erstarren der äußeren Hülle.

Jeffreys hat bei Annahme einer Maximaltemperatur von 1400° im Erdinnern berechnet, daß in einer Tiefe von 700 km unter der Erdoberfläche, also fast 6000 km vom Erdmittelpunkt entfernt, die Abkühlung gegenüber dem Erdinnern bisher nur $8-10^\circ$ betragen hat; in 300 km unter der Oberfläche macht die Abkühlung etwa $200-300^\circ$ aus, so daß man in diesen Tiefen mit Temperaturen von $1100-1200^\circ$ rechnen kann (16).

Noch näher an der Erdoberfläche wäre ohne die radioaktive Wärme die Temperatur natürlich viel niedriger, und es ist sehr zweifelhaft, ob wir ohne die radioaktiven Substanzen noch vulkanische Tätigkeit an unserer Oberfläche beobachten würden. Wenn die Erscheinungen des Vulkanismus auch häufig genug eine Zerstörung von Leben auf unseren Planeten zur Folge haben, so läßt sich doch umgekehrt mit Pompecky*) schließen, daß ohne den Vulkanismus organisches Leben auf unserer Erde vermutlich bereits erloschen wäre. Der Vulkanismus sorgt für den zum Leben notwendigen Ersatz der dauernd verbrauchten freien Kohlensäure; er ersetzt das Material, ohne das organisches Leben, pflanzliches wie tierisches, nicht existieren kann.

Fassen wir unsere Betrachtungen zusammen, so können wir sagen: Ohne Radium kein Vulkanismus; ohne Vulkanismus kein Leben, also ohne Radium kein Leben mehr auf unserem Planeten!

*) J. Pompecky: Sitzungsber. d. Preuß. Akad. d. Wissensch. 1925. S. 410.

Viertes Kapitel.

Die rhythmischen Oberflächenänderungen der festen Erdkruste.

Es steht außer Frage, daß die Erdoberfläche im Laufe der verschiedenen geologischen Epochen starken vertikalen und horizontalen Verschiebungen ausgesetzt war.

In gewissen Zeiten haben die Ozeane große Gebiete von Festland überschwemmt; zu anderen Zeiten haben sich sedimentäre Meeresablagerungen zu gewaltigen Gebirgsmassen erhoben. In eindringlicher Weise beobachten wir letzteren Vorgang z. B. an unseren Alpen: Sie bestehen zum großen Teil aus Sedimentärgesteinen, also Gesteinen, die früher den Boden der Ozeane bedeckten.

Augenscheinlich gehen im Laufe vieler Jahrmillionen sich abspielende Kreisprozesse in regelmäßiger Folge an der Erdoberfläche vor sich, die einen einseitigen Ablauf des Naturgeschehens an der Erdoberfläche, etwa die völlige Abtragung der kontinentalen Erhebungen, wieder rückgängig machen.

Wieder sind es radioaktive Wirkungen, die man als die Ursache für diese Kreisprozesse heranziehen kann.

Joly hat als erster auf diese Zusammenhänge hingewiesen; er hat sie in einer Reihe von Abhandlungen und neuerdings in einem Buch über die Oberflächengeschichte der Erde ausführlich von den verschiedensten Seiten beleuchtet und diskutiert.

Die Arbeiten Jolys können natürlich noch nicht den Anspruch erheben, die außerordentlich schwierigen und zahlreichen Fragen über die Ursachen der Gebirgsbildung und Kontinentverschiebungen mit einem Schlage restlos zu beantworten. Sicher liegt hier aber ein Versuch vor, der eine Reihe bisher rätselhafter Tatsachen unter einem einheitlichen und neuen Standpunkt zusammenfaßt und daher weitgehendes Interesse verdient.

Nach Joly ist der Verlauf der an der Erdoberfläche vor sich gehenden als „Revolutionen“ bezeichneten Kreisprozesse etwa folgender:

1. Störungen innerhalb der Erdoberfläche, die zu zeitweiligen Überflutungen durch die Meere führen,
2. stärkere und permanente Überflutung großer Festlandstreifen mit der Bildung neuer Sedimentlagerstätten,
3. Wiedererhebung des Festlandes, Rückgang des Meeres von den überfluteten Stellen,
4. endgültige Neubildung großer Gebirgsketten und Wiederherstellung der ursprünglichen kontinentalen Erhebungen.

Welche Gründe lassen sich nun für diese zyklischen Oberflächenänderungen unserer Erdkruste anführen?

Als gesichert vorausgesetzt wird die Lehre von der „Isostasie“, die besagt, daß die starre Erdkruste auf einem Medium aufruht, das in der Lage ist, den verschiedenen starken Drucken kontinentaler Erhebungen so nachzugeben, daß von einer gewissen Tiefe ab sich alle Teile mehr oder minder vollständig im hydrostatischen Gleichgewicht befinden. Die Kontinente samt ihren Gebirgen tauchen also, etwa wie die Eisberge ins Wasser, in einen dichteren Untergrund ein, der zwar nicht gegen Kräfte von kurzer Wirkungszeit, wohl aber gegen lange andauernden Druck, sich plastisch verhält. Dieses sehr zähe, „viskos-feste“ Medium, auf dem der Meeresboden aufliegt, und in das die Kontinente eintauchen, ist der Basalt, der bei

Vulkanausbrüchen als Lava an den verschiedensten Teilen der Erdoberfläche in fast stets gleicher chemischer Zusammensetzung nach oben austritt.

Alle durch den Vulkanismus an die Oberfläche der Erde gekommenen Basaltlaven, soweit sie bisher untersucht sind, enthalten eine kleine, aber deutlich nachweisbare Menge radioaktiver Substanz, die natürlich eine Quelle ständiger Wärmeentwicklung darstellt.

Über dem schwach radioaktiven (basischen) Basaltmagma lagern als oberste kontinentale Schichten die stärker aktiven (sauren) Gesteine, wie Granite, Quarzporphyre u. a. Ihre Aktivität reicht hin, um die durch Ausstrahlung von den Kontinenten verlorengelassene Wärme zu kompensieren; ihre Bodentemperatur ist gleich der der angrenzenden Basaltschichten. Der Temperaturgradient in den kontinentalen Schichten wird danach also nur von der eigenen radioaktiven Wärme aufrechterhalten. Es folgt hieraus, daß die radioaktive Wärme, die unmittelbar unter diesen kontinentalen Schichten in den Basaltgesteinen erzeugt wird, keinen Abfluß nach oben hat, es wird eine Erwärmung eintreten. Ist dieses Gesteinsmagma nahe an seinem Schmelzpunkt, so bedarf es nur noch geringfügiger Wärmezufuhr, um es ganz zum Schmelzen zu bringen. Aus dem ursprünglich sehr zähen, die Wärme schlecht ableitenden Magma entstehen viele Kilometer tiefe geschmolzene Lavamassen. Ist dieser Fall eingetreten, so gehen große Veränderungen an der Erdoberfläche vor sich (17).

Das spezifische Gewicht der geschmolzenen Lava ist etwa 7% kleiner als das des festen Gesteins, die geschmolzenen Lavamassen nehmen also einen größeren Raum ein als vorher. Die ganze äußere Oberfläche der Erde wird sich deshalb etwas ausdehnen, und zwar sowohl der von Ozeanen bedeckte Teil der Erdkruste als auch die Kontinente. Bei dieser Aus-

dehnung bricht der Ozeanboden an schwachen Stellen auf, Lavaströme ergießen sich in die Spalten, kühlen sich schnell ab und ein vergrößerter Ozeanboden entsteht, über eine Million Quadratkilometer größer als vorher.

Da nun die Dichte des Lavameeres, in das die Kontinente eintauchen, kleiner geworden ist, so müssen sie tiefer einsinken. Wenn also beim Schmelzen des Magmas zwar im ganzen ein Emporheben der gesamten Erdoberfläche statthat, so verschiebt sich doch die relative Höhe der Kontinente zu den Ozeanen zuungunsten der Kontinente. Die an der äußeren Oberfläche beobachtbare Folge ist das Überfluten der flacheren Teile des Festlandes durch das Meer (18).

Dieser Zustand kann nun nicht dauernd erhalten bleiben. Die geschmolzene, leicht bewegliche und der Anziehung des Mondes unterliegende Basaltmasse gibt ihre Wärme an die unter dem Boden der Ozeane liegenden kälteren Teile ab. Dabei wird die unter dem Ozeanboden liegende Basaltkruste bis auf wenige Kilometer Dicke abgeschmolzen, und dieser Schmelzvorgang erreicht dann sein Ende, wenn die Kruste so dünn geworden ist, daß der Abfluß der Wärme durch Wärmeleitung in den Ozean den Wärmezustrom aus dem geschmolzenen Magma gerade kompensiert.

Die langsam unter den Kontinenten angereicherte Wärme wird also nach dem Schmelzen der Lava durch die hier beschriebenen Vorgänge verhältnismäßig sehr schnell in das unerschöpfliche Reservoir der Ozeane abgeleitet. Die Temperatur unter den Kontinenten und unter den Ozeanböden sinkt, die Lava erstarrt von neuem.

Ist dieser Zustand wieder eingetreten, so beginnt der rückläufige Prozeß. Die Dichte der erhärteten Basaltmassen ist wieder so groß wie ursprünglich, ihr Volumen kleiner: Die gesamte äußere Erdkruste erfährt starke Zugkräfte nach innen, weil sich ihr Durchmesser zu verkleinern sucht. Gleich-

zeitig werden die Kontinente aus der spezifisch schwerer gewordenen festen Lavamasse herausgehoben, die Seen ziehen sich von großen Teilen des vorher überfluteten Festlandes zurück. Mit diesen Erhebungen haben die Vorgänge aber noch nicht ihr Ende erreicht. Die in dem zu umfangreich gewordenen Ozeanboden wirkenden Kräfte drücken gegen die Kontinente, sie falten sie auf, quetschen sie in die Höhe, und zwar gerade an den verhältnismäßig schwachen Stellen, die vorher von dem Meere überflutet waren. Und hier sehen wir jetzt die Aufrichtung neuer Gebirge, deren Höhe Tausende von Metern betragen kann.

Je größer die freie Ozeanfläche, desto stärker die Druckkräfte auf die angrenzenden Kontinente: Die höchsten Erhebungen an den Küsten der Kontinente grenzen an die weitesten Flächen der Ozeane!

Seit den Zeiten der ersten geologischen Schichtenbildung sind nach Joly zum mindesten sechs solcher „Erdrevolutionen“ nachweisbar. Die letzte fällt in das jüngere Tertiärzeitalter und reicht bis in die Frühzeit der Quartärperiode. Die derzeitige Gestalt unserer Alpen und die höchsten Erhebungen des Himalaja verdanken dieser letzten großen Revolution ihre Entstehung (19).

Unsere heutige Erdperiode ist dadurch gekennzeichnet, daß das Magma wieder zur zähen, schwerbeweglichen Masse erstarrt und in einen Zustand relativer Ruhe eingetreten ist; die Gebirge werden abgetragen, Sedimente neu gebildet. Unter den Kontinenten wirkt aber wieder die radioaktive Energie, ohne einen Abfluß unter den kalten Meeresboden zu finden. Jahrmillionen werden vergehen; die Wärme wird aufgespeichert, und schließlich reicht sie wieder hin, das Erweichen und Schmelzen der Lava zu bewirken: Eine neue Erdrevolution beginnt.

Die Zeit, die notwendig ist, das Schmelzen des Magmas unter den Kontinenten zu bewirken, schätzt Joly auf 30 bis

50 Millionen Jahre; die Abkühlung erfolgt dann viel schneller und ist in wenig Jahrmillionen beendet.

Daß die schnelle Abkühlung des geschmolzenen Magmas überhaupt erfolgen kann, verdanken wir im wesentlichen der wohlthätigen Rolle, die der Mond bei diesen Ereignissen spielt. Ohne ihn würde die ständige Zufuhr radioaktiver Wärme unter die Kontinente in einer Weltkatastrophe enden. Das Eingreifen des Mondes geschieht gerade im rechten Augenblick. Solange das Magma unter den Kontinenten fest ist, solange ist der Mond — selbst mit Hilfe der Sonne — machtlos, in dem Magma eine Flutwelle zu erzeugen und die Hitze abzuführen. Aber wenn das Magma geschmolzen ist und die Gefahr naht, daß die Kontinente hinwegzuschmelzen beginnen, dann kommt automatisch die Wirkung des Mondes zur Geltung. Das der Anziehung des Mondes nachgebende viele Kilometer tiefe und spezifisch schwere Lavameer wirkt auf die darüber liegende feste Erde wie eine Art Bremse. Die Rotationsgeschwindigkeit der äußeren Erde gegenüber dem inneren starren Kern wird etwas verzögert, ein langsames Verschieben der äußersten Kruste gegenüber dem Erdinnern ist die Folge, die überhitzten Lavamassen unter den Kontinenten gelangen unter den Boden der Ozeane, die Hitze wird — wie oben dargelegt — abgeleitet und die Gefahr für den Bestand unserer Kontinente ist vermieden. (20)

In den hier geschilderten Kreisprozessen sehen wir die Ursache der stetigen Verjüngung und Erneuerung der Oberfläche unseres Planeten. An Stelle eines einseitigen Ablaufs des Erdgeschehens beobachten wir eine Art Jahreszeiten unserer Erde. Sie werden verursacht durch die winzigen Mengen radioaktiver Substanz, die in den Gesteinen der äußeren Erdhülle enthalten sind. Mit Joly können wir uns ausmalen, was geschähe, wenn sie nicht vorhanden wären. Die Gebirge, ihres Jungbrunnens beraubt, werden abgetragen

und hören als solche auf zu bestehen. An den Kontinenten nagt das Meer, und unwiederbringlich werden sie allmählich im Ozean verschwinden. Festlandvegetation und Festlandleben gehen unter und mit ihnen der Mensch und der denkende Geist.

Die radioaktiven Elemente haben uns bisher vor diesem Schicksal bewahrt. Aber auch die radioaktiven Elemente bestehen nicht ewig. Sie zerfallen allmählich, und in dem Ausmaße ihres Zerfalles wird die Dauer der Revolutionen länger und weniger heftig. Ein Ende werden sie aber erst haben, wenn auch das Uran und das Thor verschwunden sind, wenn sie völlig in ihre „kalten“ Endprodukte Uranblei und Thorblei zerfallen sind. Bis dies der Fall ist, werden aber noch Tausende von Jahrmillionen vergehen.

Fünftes Kapitel.

Erläuterungen und Zusätze.

(1) Zu S. 6. An verschiedenen Stellen des Textes sind geologische Zeitabschnitte genannt, deren Bedeutung dem Fernerstehenden vielleicht nicht ganz verständlich ist. Im folgenden ist daher eine Übersicht über die gesamten geologischen Hauptformationen wiedergegeben.

Neozoische Gruppe.

Quartärformation	{	Alluvium
	{	Diluvium
	{	Pliozän
	{	Miozän
Tertiärformation	{	Oligozän
	{	Eozän
	{	Paleozän

Mesozoische Gruppe.

Kreideformation	{	Obere Kreide
	{	Untere Kreide
	{	Oberer Jura
Juraformation	{	Mittlerer Jura
	{	Unterer Jura (Lias)
	{	Keuper
Triasformation	{	Muschelkalk
	{	Buntsandstein

Paläozoische Gruppe.

Permformation	{ Zechstein Rotliegendes
Karbonformation	{ Ober-Karbon (Produktives Karbon) Unter-Karbon (Kulm und Kohlenkalk)
Devonformation	{ Ober-Devon Mittel-Devon Unter-Devon
Silurformation	{ Ober-Silur (Silur im engeren Sinne) Unter-Silur (Ordovicium)
Kambrische Formation	{ Ober-Kambrium Mittel-Kambrium Unter-Kambrium

Eozoische Gruppe (Algonkium).

Präkambrische Formation	{ Ober-Präkambrium Mittel-Präkambrium Unter-Präkambrium
----------------------------	---

Archäische Gruppe.

(2) Zu S. 9. Daß man imstande ist, zuverlässige Zahlenangaben über so ungeheuer langsam verlaufende Prozesse zu machen, wie wir sie in dem Zerfall des Urans oder Thors vor uns sehen, beruht auf der außerordentlichen Empfindlichkeit radioaktiver Meßmethoden. 1 g Uran enthält $2,5 \cdot 10^{21}$ Atome (eine Zahl mit 21 Nullen!). In der Sekunde zerfallen davon 10^4 Atome, nach chemischen Methoden eine niemals nachweisbar kleine Menge; aber die bei dieser Umwandlung gleichzeitig ausgeschleuderten α -Teilchen lassen sich durch ihre ionisierende Wirkung nach den verschiedensten Methoden nicht nur nachweisen, sondern sogar zählen.

(3) Zu S. 11. Berechnung des Alters aus der Heliummenge. 1 g Uran plus Zerfallsprodukten emittiert pro Jahr $2,8 \cdot 10^{12}$ Heliumatome. 1 ccm Helium enthält $2,7 \cdot 10^{19}$ Atome (Loschmidt-

sche Zahl); also nehmen die $2,8 \cdot 10^{12}$ Atome ein Volumen von $\frac{2,8 \cdot 10^{12}}{2,7 \cdot 10^{19}} = 1,04 \cdot 10^{-7} = \text{rund } 10^{-7} \text{ ccm ein.}$

Zur Bildung von 1 ccm Helium bedarf es also 10 Millionen Jahre. In Thormineralien verläuft die Heliumbildung wegen der geringeren Umwandlungsgeschwindigkeit des Thors und der kleineren Anzahl α -strahlender Umwandlungsprodukte mehr als dreimal so langsam. Ist daher in einem Mineral sowohl Uran als Thor enthalten, so rechnet man bezüglich seiner Heliumbildung zweckmäßig mit Uranäquivalenten, wobei $1 \text{ g Th} = 0,3 \text{ g U}$ gesetzt ist. Das in der Tabelle angegebene Heliumverhältnis ist das Verhältnis von Helium in ccm pro Gramm Uran in dem Mineral. Das Alter ist also gegeben durch $\frac{\text{He (cm}^3\text{)}}{\text{U} + 0,3 \text{ Th}} \cdot 10 \text{ Millionen.}$

Zu bemerken ist hierbei, daß das Uranäquivalent für das Thorium ($1 \text{ g Th} = 0,3 \text{ g U}$) etwas unsicher ist, weil es von der Halbwertszeit des Thoriums abhängt, die noch nicht sicher bekannt ist. Der für die obige Berechnung verwendete Wert der Halbwertszeit des Thoriums von $1,3 \cdot 10^{10}$ Jahren ist vermutlich etwas zu niedrig; die Halbwertszeit wird jetzt mit 1,6, zuweilen mit $2,0 \cdot 10^{10}$ Jahren angegeben. Der obige Faktor 0,3 würde sich bei Einsetzung des höchsten Wertes für die Halbwertszeit des Thors auf etwa 0,2 reduzieren. Da in den meisten der für die Altersbestimmungen verwendeten Mineralien das Thor aber nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Korrektur für das Alter nicht groß und von einer Netzberechnung konnte abgesehen werden, weil die Heliumwerte sowieso nur Näherungswerte vorstellen.

(4) Zu S. 16. Berechnung des Alters aus dem Bleigehalt. Die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans ist gleich $1,4 \cdot 10^{-10} \text{ Jahre}^{-1}$ d. h. pro Jahr zerfällt etwas mehr als ein Zehnmilliardstel der vorhandenen Menge. 1 g Uran (Atomgewicht 238) bildet

daher pro Jahr $1,4 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{206}{238} = 1,21 \cdot 10^{-10}$ g Blei (Atomgewicht 206). Für Zeiten, die gegenüber der Umwandlungsgeschwindigkeit des Urans klein sind, ergibt sich hieraus das Alter eines Minerals direkt durch Division der pro 1 g Uran gefundenen Bleimenge durch $1,2 \cdot 10^{-10}$ g, oder durch Multiplikation mit 8200 Millionen; also $t = \frac{\text{Pb}}{\text{U}} \cdot 8200$ Millionen

Jahre. Bei geologisch älteren Mineralien muß man aber den Zerfall des Urans berücksichtigen, denn die heute in einem derartigen Mineral gefundene Uranmenge ist ja kleiner als die ursprüngliche. Die genaue Berechnung geschieht in folgender Weise:

Von der ursprünglichen Zahl von N_0 Uranatomen sind in der Zeit t noch $N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ Atome vorhanden; zerfallen sind also $N_0 (1 - e^{-\lambda t})$ Atome, und eben so viele Bleiatome haben sich gebildet. Unter Berücksichtigung des Atomgewichts des Urans 238 und des Uranbleis 206 besteht also die Gleichung

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

Innerhalb der Zeiten, die für das Alter geologischer Formationen auf der Erde überhaupt in Betracht kommen, kann man nach Holmes für die Altersbestimmung eine einfachere empirische Gleichung verwenden, indem man die mittlere, der Berechnung zugrunde zu legende Uranmenge $U_m = \frac{U_0 + U_t}{2}$ setzt. U_t wird experimentell ermittelt, U_0 berechnet sich aus $U_0 = U_t + 8 \text{ He} + \text{Pb}$; dem Gewicht nach gibt dies $U_0 = U_t + 1,16 \text{ Pb}$; also ist

$$U_m = \frac{U_t + 1,16 \text{ Pb} + U_t}{2} = U_t + 0,58 \text{ Pb}.$$

Das Alter ergibt sich dann also zu $t = \frac{\text{Pb}}{U_t + 0,58 \text{ Pb}} \cdot 8200$ Millionen Jahre.

(5) Zu S. 20. Aus der (nur ungefähr bekannten) Umwandlungsgeschwindigkeit des Thors folgt, daß bei einer Bildung von $1,2 \cdot 10^{-10}$ g Uranblei aus Uran die entsprechende Menge Thorblei aus 1 g Thorium nur etwa ein Drittel so groß ist. Lawson, der sich vor allem mit Altersbestimmungen aus Thormineralien befaßte, wählte als Umrechnungsfaktor 0,384, indem er als Halbwertszeit des Thors den Wert $1,3 \cdot 10^{-10}$ Jahre einsetzte. Für die Altersbestimmung in einem neben dem Thorium auch Uran enthaltenden Mineral nach der Bleimethode ergibt sich daher die angenäherte Formel

$$t = \frac{\text{Pb}}{\text{U} + 0,384 \text{Th}} \cdot 8200 \text{ Millionen Jahre.}$$

Für genauere Berechnungen muß wieder der Zerfall des Urans (plus dem Uranäquivalent 0,384 Th) seit der Bildung des Minerals in Rücksicht gezogen werden.

(6) Zu S. 20. Eine Anzahl verschiedener Thormineralien aus dem Mitteldevon von Brevig in Norwegen zeigte Alterswerte, die zwischen 10 Millionen und 300 Millionen Jahre schwanken. Bei gleichem geologischen Vorkommen wurde das Alter um so niedriger gefunden, je höher der Thor-gehalt des Minerals gegenüber dem Urangehalt war. Die niedrigsten Werte fanden sich für das Verhältnis Thor : Uran um 100 herum*). Derartige Mineralien, wie Freyalith, Tritomit, manche Thorite, sind sämtlich amorph und zweifellos sekundären Ursprungs. Für Altersbestimmungen geologischer Formationen können sie daher nicht in Frage kommen.

Daß auch Auslaugungsprozesse bei den amorphen Mineralien eine große Rolle spielen, läßt sich mit mancherlei Beispielen belegen: Ein kristallisierter Ceylonthorianit enthielt die aus seinem geologischen Vorkommen zu erwartende Menge Blei und Helium; bei einem an gleicher Fundstelle vorkom-

*) R. W. Lawson: Wien. Ber. Bd. 126, S. 727. 1917,

menden (amorphen) Thorit wurde kein Blei und augenscheinlich auch kein Helium nachgewiesen*).

Auch eine Beobachtung am Rutherfordin, einer äußerlich zu Urankarbonat verwitterten kristallisierten Pechblende, stützt diese Vermutung. Das Verhältnis $Pb : U$ in der verwitterten (amorphen) Hülle des Kristalls wurde beträchtlich kleiner gefunden als das entsprechende Verhältnis im kristallisierten Kern**).

Im Gegensatz zu den amorphen Mineralien ergaben kristallisierte Thormineralien Alterswerte, die sehr wohl ihrem geologischen Vorkommen entsprechen dürften. Hierher gehören vor allem die in Ceylon in schönen kubischen Kristallen gefundenen Thorianite. Durch kritische Auswertung der Thor-, Uran- und Bleianalysen an diesen Mineralien errechnete Kirsch für ein augenscheinlich früheres geologisches Vorkommen derselben ein Alter von 500—600 Millionen, für spätere Kristallisationen 420—440 Millionen Jahre***).

(7) Zu S. 22. Das hohe Alter der Sedimente und Ozeane. Dem hohen Wert von 1600 Millionen Jahren für das Mindestalter der Ozeane kommt natürlich ein besonderes Interesse zu, und es könnte vielleicht etwas kühn erscheinen, aus der einen Angabe der 21% Blei pro Gramm Uran einen so weitgehenden Schluß zu ziehen. Hierzu ist nun folgendes zu bemerken. Der für die Analyse verwendete Zirkon lag in genügend großer Menge vor um die Durchführung zweier unabhängigen Bleianalysen zu gestatten. Die 21% sind der Mittelwert aus den beiden Bestimmungen†). Eine Atomgewichtsbestimmung des Bleis wurde allerdings nicht durch-

*) B. Boltwood, Americ. Journ. Science Bd. 23, S. 77. 1907.

***) W. W. Marckwald und A. S. Russell: Ber. Chem. Ges. Bd. 44, S. 771. 1911.

****) G. Kirsch: Wien. Ber. (IIa) Bd. 131, S. 551. 1922.

†) A. Holmes: Quarterly Journ. Geol. Soc. London Bd. 74, S. 85. 1918.

geführt. Aber es ist äußerst unwahrscheinlich, daß der Zirkon bei seiner Kristallisation gewöhnliches Blei in sein Gitter eingeschlossen hätte*), und ebenso unwahrscheinlich ist es, daß aus diesem äußerst widerstandsfähigen, fast unangreifbaren Mineral durch sekundäre Einflüsse Uran entfernt worden und Uranblei zurückgeblieben wäre.

[Daß bei anderen Mineralien ein solcher Fall eintreten kann, beweisen die Pechblendevorkommen im belgischen Kongo (Katanga), die pro Gramm Uran teilweise mehr als 40% Uranblei vom Atomgewicht 206,04 enthalten. Hier sieht man aber schon auf den ersten Anblick, daß es sich um stark verwitterte, sekundär umgewandelte Mineralien handelt, die für Altersbestimmungen ausscheiden müssen**).]

Der obige Wert von 21% Blei in einem primären, kristallisierten, unverändertem Mineral steht übrigens nicht allein da. Strutt hat bei seinen Altersbestimmungen von Mineralien nach der Heliummethode Zirkone kanadischer Herkunft aus präkambrischer Lagerstätte untersucht — er fand dafür, wie zu erwarten, höhere Heliumwerte als für irgendwelche anderen Mineralvorkommen — und ein solcher Zirkon (aus Sebastopol in Ontario) wurde von A. Holmes auf seinen Bleigehalt geprüft; er fand 24% Blei***). Unter der wahrscheinlichen Annahme, daß auch dieses Blei rein radioaktiven Ursprungs war, ergibt sich für das Alter des Minerals ein Wert von mehr als 1700 Millionen Jahren!†)

*) Siehe hierzu H. V. Ellsworth: *Americ. Journ. Science* (5) Bd. 9, S. 135. 1925.

***) O. Hönigschmid und L. Birkenbach: *Ber. d. Deutsch. Chem. Ges.* Bd. 56, S. 1837. 1923.

***) A. Holmes: *Quarterly Journ.* 1. c.

†) Eine sehr schöne Bestätigung des hohen Alters präkambrischer Mineralien findet sich in einer in jüngster Zeit erschienenen Mitteilung von Th. W. Richards und L. P. Hall (*Journ. Americ. Chem. Soc.* 48, 704, 1926). Die Verff. machen Atomgewichtsbestimmungen des Bleis aus einer — kleine Mengen von Thorium enthaltenden — präkambrischen Uranpechblende von Keystone, Süd-Dakota, die fast 23% Blei pro

Liegen, wie dies bei den Zirkonen im allgemeinen der Fall zu sein scheint, Mineralien in unverwitterter und unzersetzter Form vor, sind sie außerdem frei von gewöhnlichem Blei, dann kann man aus dem Verhältnis Blei : Uran nicht nur das Alter des Minerals ablesen, man kann umgekehrt, wo aus äußeren Gründen sich über die geologische Zugehörigkeit der Gesteinsarten, in denen das Mineral vorkommt, nichts Eindeutiges feststellen läßt, diese Feststellung auf Grund des Blei-Uranverhältnisses machen. Holmes teilt, wie es auch auf der geologischen Tabelle (S. 42) geschehen ist, die präkambrische Periode in Ober-, Mittel- und Unterpräkambrium ein. Dem Mittelpräkambrium gehören Gesteine an mit einem Uranbleigehalt von 13—17 % pro Gramm Uran, dem Unterpräkambrium solche bis zu 24 %. Das Mittelpräkambrium liegt danach in den Zeitgrenzen zwischen 1000—1300 Millionen, das untere erstreckt sich bis über 1700 Millionen Jahre.

Aus den innerhalb der obigen Grenzen übereinstimmenden Werten für das Alter mittelpräkambrischer Schichten von Fundorten aus vier verschiedenen Erdteilen (Norwegen, Indien, Mozambique, Kanada) ergibt sich die Gleichzeitigkeit geologischer Erdentwicklung auf unserem Planeten.

Die Abkühlungszeit der heißen Erdkruste. Wenn wir nach alledem ziemlich präzise Aussagen machen können über das Alter der schon abgekühlten Erdkruste, so liegt die Frage nahe, ob man die Bleimethode zur Ermittlung des Alters von Mineralien nicht auch anwenden kann für die Bestimmung der längeren Zeit, die seit der ersten Entstehung

Gramm Uran enthält. Wird der geringe Gehalt an Thorblei in Rechnung gezogen, so finden sie für das Atomgewicht des Uranbleis einen Wert von 206,02, also nahezu den theoretischen Wert; das Verhältnis Uranblei : Uran ergibt sich zu 22,5 %. Das nach der auf Seite 45 und 46 angegebenen Berechnungsweise ermittelte Alter für dieses primäre Mineral ist 1600 Millionen Jahre!

einer festen Kruste auf der geschmolzenen Erdmasse verfließen ist. Hier lassen sich nun keinerlei direkte Aussagen machen, denn wirklich primäre Gesteine der äußersten Erdoberfläche sind überhaupt nicht mit Sicherheit bekannt. Sie sind entweder durch die Denudation der Flüsse abgewaschen oder unter tiefen Sedimentschichten vergraben*).

Will man sich über die frühere Geschichte der Erde eine Vorstellung machen, so muß man astrophysikalische Beobachtungen zu Rate ziehen, und aus solchen läßt sich der wahrscheinliche Schluß ziehen, daß die Zeit, die zwischen einer feurig-flüssigen (oder gasförmigen) Erde und einer oberflächlich auf unter 100° C abgekühlten Erde verstrichen ist, kürzer, vielleicht viel kürzer war, als die entsprechende Zeit seit der Entstehung der Ozeane bis heute**).

(8) Zu S. 22. Einige der Einwände, die gegen die Stichhaltigkeit der früheren Altersbestimmungen aus der Sedimentierungsgeschwindigkeit und dem Salzgehalt der Ozeane angeführt wurden, seien hier kurz besprochen***).

Es sind an zahlreichen Orten Unregelmäßigkeiten in der Kontinuität der sedimentären Ablagerungen festgestellt worden. Die unter menschlicher Kultur stehenden Erdbereiche erfahren eine viel größere Abtragung als das unkultivierte Umland: Die Abfließwässer von bebautem Boden laufen trübe, die von jungfräulichem Boden klar.

Unsere heutige Erdepoche liegt kurz hinter einer Periode erhöhter eruptiver Tätigkeit und starker Gebirgsbildung (s. S. 39). Die mittleren Erhebungen der Kontinente sind

*) A. P. Coleman: Nature Bd. 109, S. 775. 1922; H. Jeffreys: Nature Bd. 110, S. 148. 1922; G. A. J. Cole: Nature Bd. 110, S. 39. 1922.

***) H. Jeffreys: The Earth l. c. S. 75—78, siehe auch W. Nernst: l. c. S. 46.

****) Außer der schon S. 23 zitierten Mitteilung von J. W. Gregory siehe vor allem: Chamberlin and others: Report Smithsonian Inst. 1922, S. 244—261.

daher jetzt höher, vielleicht drei bis viermal höher als im Durchschnitt der erdgeschichtlichen Epochen. Die Abtragung der Gebirge ist also entsprechend intensiver. Auf der anderen Seite würden die sanften Erhebungen zu Zeiten geringerer Höhendifferenzen eine gleichmäßigere Verteilung des Regens bringen, der nicht aufgenommene Teil langsamer abfließen.

Alle diese Beispiele stützen die Vermutung, daß die heute beobachtete Denudationsgeschwindigkeit wesentlich höher ist, als dem Durchschnitt entspricht. Hinzu kommt, daß die Mächtigkeit der Sedimentschichten vermutlich wesentlich unterschätzt wurde. An vielen Orten der Erde häufen sich die Beobachtungen, daß die frühesten Schichten sedimentärer Ablagerungen nicht mit den bisher bekannten Schichten des Präkambriums oder Archäikums ihren Anfang nehmen. In der Tat hat man noch nirgendwo die originale Kruste der einst geschmolzenen Erdoberfläche mit Sicherheit festgestellt (siehe S. 49).

Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Salzgehalt der Ozeane. Der Gehalt von Chlor zu Natrium in Seewasser ist $1 : 0,6$; das entsprechende Verhältnis in den Primärgesteinen ist aber $1 : 30$. Auf gleichen Chlorgehalt bezogen ist also 50 mal mehr Natrium in den Gesteinen enthalten als im Ozean, und selbst wenn man den geringen Natriumgehalt der Sedimente mitrechnet, ergibt sich immer noch ein großer Überschuß des Natriums in den Gesteinen gegenüber dem Chlor. Es kann also nicht bezweifelt werden, daß die Zufuhr des Natriums aus den Flüssen zum Meere kein wirklich irreversibler Prozeß ist, sondern ein teilweiser Kreisprozeß; er bedingt, daß der Gehalt des Seewassers an Natrium viel geringer ist, als der Dauer der Auslaugungsprozesse entspricht. Nach Chamberlin ist der Chlorgehalt des Seewassers für Altersbestimmungen viel geeigneter als der Natriumgehalt.

Die ganzen Fragenkomplexe hängen von so viel variablen Einflüssen ab, daß sie als Methoden zur Altersbestimmung

unbrauchbar werden. Um mit den Worten Chamberlins zu schließen: „Die Kenntnisse, die wir über Fragen des Erdalters aus der Ozeanographie erhalten, sollten nicht auf die Bank der Zeugen kommen, um dort ihre Aussagen zu machen, sondern viel eher selbst vor ein Untersuchungsgericht gestellt werden.“

(9) Zu S. 26. Zur Altersbestimmung der natürlichen Höfe ist die Kenntnis der Größe des Kerns und sein Gehalt an radioaktiver Substanz notwendig. Die Größe wurde durch mikroskopische Ausmessung der Kerndimensionen geschätzt, für den Gehalt an aktiver Substanz die etwas willkürliche Annahme gemacht, daß die den Kern bildenden Zirkone etwa 10% Uran enthalten. Da der Urangehalt solcher Zirkone im allgemeinen beträchtlich kleiner ist als 10%, so ergibt sich aus dieser Annahme eine untere Grenze des Alters. Die auf diese Weise erhaltenen Werte schwankten bei 30 verschiedenen Proben desselben Glimmermaterials zwischen 20 und 470 Millionen Jahren. Es ist naheliegend, den Grund für diese großen Unterschiede in einem wechselnden Urangehalt der Zirkonkerne zu suchen, und bei der Annahme von 1% Urangehalt statt 10% fände man z. B. für die Probe, die 20 Millionen Jahre ergeben hat, einen Wert von 200 Millionen. Der auf S. 25 angegebene Höchstwert von 470 Millionen Jahren ist daher der zuverlässigste.

(10) Zu S. 26. Die Empfindlichkeit des Radiumnachweises in pleochroitischen Höfen älterer Mineralien übertrifft noch bei weitem den schon so überaus scharfen Nachweis kleiner Radiummengen auf elektroskopischem Wege. Durch Vergleich der photographischen α -Strahlenwirkung isolierter Zirkonkriställchen aus natürlichen Glimmern mit der Wirkung minimaler Pechblendemengen (etwa 10^{-9} g) konnte Gudden*) berechnen, daß Kerne mit weniger als 10^{-11} g Uran, also weniger als 10^{-17} g Radium, hinreichten, um in

*) B. Gudden: Pleochroitische Höfe. Diss. Göttingen 1919.

den Glimmern des Devons einen deutlichen Hof zu erzeugen. Eine solch winzige Menge radioaktiver Substanz emittiert pro Jahr weniger als 30α -Teilchen!

(11) Zu S. 22 u. 26. Jolys abweichende Ansichten über das Alter der festen Erdkruste. Als Hauptergebnis der in Kap. 2 erörterten Altersbestimmungen der festen Erdkruste wurde die Ansicht vertreten, daß die Bestimmungen aus dem Bleigehalt kristallisierter Uranmineralien allen anderen Methoden der Altersbestimmung geologischer Formationen überlegen sind, und daß wir mit einem Mindestalter der abgekühlten Erdkruste von mindestens 1600 Millionen rechnen müssen. Der wegen seiner zahlreichen Arbeiten über die Bedeutung der Radioaktivität auf erdgeschichtliche Fragen auch in dieser Abhandlung häufig erwähnte englische Geologe Joly steht nun auf einem von dem obigen stark abweichenden Standpunkt, und es ist notwendig, die Ansichten Jolys hier wiederzugeben und zu prüfen, ob und inwieweit sie berechtigt sind oder nicht.

Joly nimmt an, daß die Alterswerte aus dem Uranbleigehalt der Mineralien um ein mehrfaches zu hoch seien und weist den ältesten geologischen Formationen ein Alter von höchstens 200—250 Millionen Jahren zu. Die Gründe, die Joly anführt, sind folgende*):

1. Die experimentell aus dem Salzgehalt der Ozeane und der Abtragungsgeschwindigkeit der Gebirge erhaltenen Resultate sprechen für den niedrigen Wert.

2. Die Bleibestimmungen aus den meisten Thormineralien ergeben viel niedrigere Werte als die aus Uranmineralien.

3. Die pleochroitischen Höfe, die durch uranhaltige Einsprenglinge hervorgerufen sind, weisen nach Joly — im Gegensatz zu den Thoriumhöfen — auf Schwankungen in der Reichweite des Urans hin, derart, daß das Uran in geologisch

*) Nature Bd. 109, S. 480. 1922.

alten Mineralien eine größere α -Strahlenreichweite zeigt als das in jüngeren. Unter Verwendung einer bekannten Beziehung zwischen der Reichweite der α -Strahlen und der Umwandlungsgeschwindigkeit des die Strahlen emittierenden Radioelements, die in der sog. Geiger - Nuttallschen Formel ihren mathematischen Ausdruck findet, schließt Joly aus seinen Befunden an den Uranhöfen auf eine größere Umwandlungsgeschwindigkeit des Urans in früheren Erdepochen oder auf das frühere Vorhandensein unbekannter, ebenfalls zum Blei führender Uranisotope, deren Wirkung wir also in den Höfen alter Mineralien beobachten, während die Substanzen selbst heute ausgestorben sind. Beide Annahmen müßten dazu führen, daß in früheren Zeiten die Bildung des Bleis aus Uran schneller verlaufen sein müßte, als wir sie heute beobachten. Die Altersschätzungen nach der Bleimethode ergäben also zu hohe Werte. Die in der Zwischenzeit durch Gudden bekanntgewordenen vorzüglich scharf definierten Uranhöfe im Wölsendorfer Flußspat (S. 24) deutet Joly ebenfalls im Sinne seiner obigen Vermutung. Die bisher angenommene Reichweite der α -Strahlen des Urans I in Luft war 2,53 cm, aus den Flußspathöfen ergeben sich dagegen 2,68 cm. Besteht die Geiger - Nuttallsche Formel zu Recht, dann war nach Joly der Uranzerfall in dem geologisch alten Wölsendorfer Flußspat etwa 50 mal schneller, als er heute beobachtet wird!

Von diesen drei von Joly für ein niedrigeres Alter angeführten Gründen wurden die beiden ersten schon weiter oben diskutiert und gezeigt, daß die aus ihnen abgeleiteten Alterswerte mit so viel Unsicherheiten behaftet sind, daß ihnen eine Beweiskraft nicht beizulegen ist (S. 50, 51 und S. 20, 46, 47).

Was den Punkt 3 anbelangt, so ist folgendes zu sagen. Die Bestimmung des Durchmessers der Höfe an den von Joly untersuchten Mineralien kann genau nur für die äußerste

Zone, also den Wirkungsbereich der α -Strahlen des Radium C durchgeführt werden*). Am Radium C hat Joly keine Änderungen und Verwaschungen der Reichweite festgestellt. Die inneren Höfe sind — schon wegen der aus geometrischen Gründen bedingten relativ viel größeren Intensität und dem nahen Beieinanderliegen einer ganzen Anzahl von Ringen — viel schwerer auszumessen; es ist außerdem nicht von der Hand zu weisen, daß die älteren Höfe wegen ihrer stärkeren „Entwicklung“ den wirklich äußersten Bereich der α -Strahlen, die von der Oberfläche des radioaktiven Einsprenglings stammen, aufzeichnen, während bei jüngeren Mineralien nur ein Mittelwert beobachtet wird. Für die durchdringenden Strahlen des Radium C ist dieser Schwankungsbereich naturgemäß viel kleiner.

Daß das Uran in früheren geologischen Epochen nach einem anderen Gesetz zerfallen sein soll, als wir es heute beobachten, muß nach allem, was wir aus den radioaktiven Gesetzen kennen, als ausgeschlossen gelten. Wenn andererseits unbekanntere schneller zerfallende Uranisotope mit dem Uran auskristallisierten, sich also an der Bleibildung beteiligten, dann ist es sehr schwer zu verstehen, daß die Folgeprodukte dieser Uranisotope α -Strahlen derselben Reichweite gehabt haben sollten, wie die heute bekannten Zerfallsprodukte des Urans. Hätten sie aber andere gehabt, dann dürfte nicht nur der innerste Uranring die beobachteten Reichweiteschwankungen zeigen, sondern alle Ringe müßten verwaschen sein.

Was nun schließlich die Höfe im Wölsendorfer Flußspat anbelangt, die Joly als Stütze für seine Hypothese eines früher anders verlaufenden Uranzerfalls anführt, so müßten diese Höfe bei ihrer großen Klarheit die allmähliche Änderung der Reichweite der α -Strahlen des Urans etwa gegen-

*) B. Gudden: Z. f. Phys. 1. c.

über der des Radiums C besonders gut zeigen. Das Gegenteil ist der Fall. Die Ringe sind so scharf, daß man aus ihnen die Reichweiten der α -Strahlen des Urans genauer als nach den bisherigen Methoden bestimmen konnte. Nicht hat sich, wie Joly vermutet, die Reichweite der α -Strahlen des Urans im Laufe der Jahrmillionen von 2,68 auf 2,53 verringert, sondern der bisher angenommene Wert von 2,53 cm ist zu niedrig, er ist durch den genaueren Wert von 2,68 cm zu ersetzen! Es folgt hieraus allerdings, daß eine Extrapolation der Geiger - Nutallschen Formel auf extrem lange Halbwertszeiten, wie sie das Uran besitzt, nicht zulässig ist. Für extrem kurze Halbwertszeiten wurde die Unzulänglichkeit einer solchen Extrapolation aber schon vorher nachgewiesen.

Die Diskussion dieser Punkte mußte wegen der sehr wichtigen Fragen, die damit zusammenhängen, etwas ausführlicher behandelt werden. Es scheint aber nach allem, was gesagt wurde, der Schluß berechtigt, daß die Jolyschen Anschauungen nicht überzeugend genug sind, die im Kap. 2 gefolgerten Schlüsse über das Alter der festen Erdkruste umzustoßen.

(12) Zu S. 29. Der durchschnittliche Gehalt der Gesteine an Thorium ist zwei- bis dreimal so hoch als der an Uran. Besonders bei den Eruptivgesteinen fällt dabei ein bemerkenswerter Parallelismus in dem Gehalt an Uran und Thor auf. Er läßt auf ähnliche Abscheidungsbedingungen der beiden Elemente aus dem geschmolzenen Magma schließen. Dies ist verständlich, wenn man die kristallographischen Eigenschaften analoger Uran- und Thorverbindungen ins Auge faßt. Sowohl Urandioxyd und Thoriumdioxyd sind miteinander isomorph, als auch z. B. die typischen primären Uranmineralien Bröggerit und Cleveit mit dem Thormineral Thorianit*). Aus den

*) V. M. Goldschmidt und L. Thomassen: Skrifter Kristiania 1923, Nr. II.

Gesteinsschmelzen werden sie sich also als isomorphe Mischungen entsprechend ihrem gegenseitigen Mengenverhältnis ausscheiden, und das konstante Verhältnis in ihrem Vorkommen hat daher nichts Wunderbares, sondern ist sogar zu erwarten.

(13) Zu S. 30. Wärmeentwicklung der radioaktiven Mineralien und Wärmeverlust der Erde durch Ausstrahlung. Aus dem mittleren Gehalt der festen Erdkruste an radioaktiven Substanzen berechnet sich die Wärme, die der Erde durch die radioaktiven Prozesse zugeführt wird, in folgender Weise*).

1 g Uran im Gleichgewicht mit allen seinen Zerfallsprodukten liefert $2,5 \cdot 10^{-8}$ cal/sek.

1 g Thor im Gleichgewicht mit allen seinen Zerfallsprodukten liefert $0,68 \cdot 10^{-8}$ cal/sek.

Mittlerer Urangehalt = $6 \cdot 10^{-6}$; Gehalt von 1 cm³ $16,2 \cdot 10^{-6}$ g U/cm³ (spez. Gew. = 2,7).

Mittlerer Thorgehalt = $20 \cdot 10^{-6}$; Gehalt von 1 cm³ $54 \cdot 10^{-6}$ g Th/cm³.

Wärmeproduktion in 1 cm³ Gestein durch Uran
= $40,5 \cdot 10^{-14}$ cal/cm³·sek.

Wärmeproduktion in 1 cm³ Gestein durch Thorium
= $36,7 \cdot 10^{-14}$ cal/cm³·sek.

Uran + Thor = $77,2 \cdot 10^{-14}$ cal/cm³·sek. = W.

Der Gesamtwärmeverlust Q , den die feste Erdoberfläche durch Ausstrahlung in den Weltraum erleidet, ergibt sich aus der Formel

$$Q = 4\pi r^2 \cdot K \cdot \frac{dQ}{dx}.$$

Hierin ist r der Radius der Erde, also $4\pi r^2$ ihre Oberfläche.

*) Nach Stef. Meyer u. E. v. Schweidler: Lehrbuch der Radioaktivität, 1916, S. 444.

K ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Gesteine, $\frac{dQ}{dx}$ der Temperaturgradient von außen nach der Tiefe, die „geothermische Tiefenstufe“.

$$4 \pi r^2 = 5,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$$

K schwankt etwas, je nach der Gesteinsart, es ist hier mit $0,004 \text{ cal/cm} \cdot \text{sek./Grad}$ angenommen.

$$\frac{dQ}{dx} \text{ ist } 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Grad/cm}$$

Unter Einsetzung der Werte erhält man $Q = 6 \cdot 10^{12} \text{ cal/sek.}$

Um diesen Wärmeverlust zu decken, sind

$\frac{6 \cdot 10^{12}}{2,5 \cdot 10^{-8}} = 2,4 \cdot 10^{20} \text{ g Uran}$ erforderlich, denn 1 g Uran liefert ja $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ cal/sek.}$

Nimmt man nun an, daß der mittlere Urangehalt der sauren Gesteine der äußersten Erdkruste für das Material des ganzen Erdballs gelte, so erhält man für die in der Erde mit der Masse $6 \cdot 10^{27} \text{ g}$ vorhandene Uranmenge den Betrag von $3,6 \cdot 10^{22} \text{ g}$. Dieser Wert ist 150 mal größer als die Menge, die notwendig ist, den gesamten Strahlungsverlust der Erde nach außen zu kompensieren.

Macht man die entsprechende Rechnung für das Thorium, so erhält man für die zur Kompensation notwendige Menge Thorium den Wert $9 \cdot 10^{20} \text{ g}$ gegenüber einem Gesamt-Thoriumgehalt von $12 \cdot 10^{22} \text{ g}$, also den 130fachen Betrag.

(14) Zu S. 30. Ausbreitung der radioaktiven Substanzen nach der Tiefe. Um den durch Ausstrahlung in den Weltenraum verlorengehenden Betrag an Erdwärme zu kompensieren, bedarf es des Gesteinsvolumens $\frac{Q}{W} = \frac{6 \cdot 10^{12}}{7,7 \cdot 10^{-13}} = 8 \cdot 10^{24} \text{ cm}^3$ [siehe (13)]. Bei einem Gesamtvolumen der Erde von 10^{27} cm^3 entspricht jener Betrag einer Rindenschicht von 16 km Dicke. Würde man die geringere Aktivität der

basischen Gesteine der Rechnung zugrunde legen, so käme man auf eine Schicht von ca. 35 km Tiefe.

(15) Zu S. 31. Chemische Gründe für die Anreicherung von Uran und Thor in der äußeren Erdkruste. Es mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen, daß die Verbindungen der Elemente mit dem höchsten Atomgewicht, das Uran und das Thor, sich gerade an der äußeren Peripherie der Erde angereichert haben sollen und nicht, ihrem hohen spez. Gew. entsprechend, nach der Tiefe gesunken sind. Die Untersuchungen von V. M. Goldschmidt über die geochemischen Verteilungsgesetze der Elemente geben auf diese Frage Antwort*). Unter dem Einfluß der Abkühlung hat sich die ursprünglich gasförmige oder schmelzflüssige Erde in drei Hauptphasen geschieden: den innersten Metallschmelzfluß, den mittleren Sulfidschmelzfluß und den äußeren Silikatschmelzfluß. Nur die letztgenannte Phase ist direkter experimenteller Untersuchung zugänglich; und der Verfasser studiert die Verteilung der Elemente dieser Silikatschmelze, wenn diese unter dem Einfluß allmählicher Abkühlung zur Kristallisation gebracht wird. Diese geschieht ihrerseits wieder in drei Untergruppen, den Erstkristallisationen, den Hauptkristallisationen und den Restkristallisationen. Zu den letzten gehören die mit den Hauptelementen der Silikathülle nicht mehr isomorphen Elemente: u. a. Erdsäuren, seltene Erden, Uran und Thor. Nach dem Verfasser ist es unbestritten, daß diese Elemente sich in den Restschmelzen anreichern, gerade weil die Schwere oder Größe der Atome das isomorphe Eintreten in die gewöhnlichen Mineralien der Silikathülle erschwert, und daß dann gerade diese schweren Atomarten, weil sie in der relativ leichten Restschmelze (die reich an Kieselsäure und Wasser ist) gelöst bleiben, mit diesen aufsteigen. Durch den Mangel

*) V. M. Goldschmidt: Geochemische Verteilungsgesetze Skrifter Kristiania I und II 1923 und 1924.

an Isomorphie mit den Hauptelementen der Silikathülle erklärt sich also das Vorkommen von Uran und Thor in den äußersten Schichten der Erde, durch den Isomorphismus der Thor- und Uranverbindungen untereinander erklärt sich das konstante Verhältnis der beiden in den untersuchten Gesteinsproben.

(16) Zu S. 33. Zahlenangaben über die Temperaturen im Innern der Erde lassen sich natürlich nur unter gewissen, mehr oder weniger hypothetischen Annahmen machen. Denn von dem über 6000 km betragenden Erdradius sind bisher ja nur 2 km experimenteller Prüfung zugänglich. Die auf S. 33 u. 34 angegebenen Temperaturen sind von H. Jeffreys berechnet, der sich sehr ausführlich mit den während der Erdgeschichte im Innern der Erde vorgegangenen Temperaturänderungen beschäftigt hat*). Gestützt werden die Resultate durch Untersuchungen einer Reihe anderer Forscher**), so daß man wohl sicher sein kann, daß die oben skizzierte relative Temperaturverteilung der Wahrheit ziemlich nahekommen wird, wenn auch über die absolute Temperatur im inneren Kern der Erde sichere Angaben nicht gemacht werden können.

(17) Zu S. 37. Berechnung der Zeit, die zum Schmelzen des Magmas notwendig ist. Der Radiumgehalt pro Gramm Basaltlava ist im Mittel $1,0 \cdot 10^{-12}$ g.

Der Thorgehalt pro Gramm Basaltlava (nach Joly) $8 \cdot 10^{-6}$ g.

Die Wärmeproduktion pro Gramm Radium (mit allen zugehörigen Elementen beträgt) $5,6 \cdot 10^{-2}$ cal/sek.

Die Wärmeproduktion pro Gramm Thorium beträgt $6,6 \cdot 10^{-9}$ cal/sek.

*) H. Jeffreys: The Earth S. 79—91.

**) Ingersoll und Zobel: l. c. R. Holmes: Geol. Mag. (6) Bd. 2, S. 67. 1915; Sokolow: Journ. Phys. et le Rad. (6) Bd. 5, S. 153. 1924.

Hieraus ergibt sich die Wärmeproduktion pro Gramm Basalt zu $0,11 \cdot 10^{-12}$ cal/sek*).

Das feste Magma befindet sich nur wenig unter seinem Schmelzpunkt. Seine Temperatur ist schätzungsweise 1050° gegenüber einem Schmelzpunkt von 1150° unter den in Betracht kommenden Drucken. Um es zum Schmelzen zu bringen, muß die Schmelztemperatur erreicht und außerdem die latente Schmelzwärme des Basalts geliefert werden. Die latente Schmelzwärme ist etwa 90 cal., die spez. Wärme 0,23 cal. Um das Schmelzen zu bewirken, bedarf es also pro Gramm Basalt $90 + 100 \cdot 0,23 = 113$ cal. Selbstverständlich können diese Zahlen nur als ungefähre Schätzungen gelten.

Die in dem Basalt enthaltenen Radioelemente liefern, wie wir gesehen haben, pro Gramm $0,11 \cdot 12^{-12}$ cal/sek; dies gibt in einer Million Jahre eine Wärmeproduktion von 3,46 cal. Um die obigen 113 cal zu liefern, bedarf es also 33 Millionen Jahre. Wählt man die Daten über die mittlere Aktivität der Basalte etwas kleiner, die latente Schmelzwärme etwas größer, dann käme man zu annähernd doppelt so großen Zahlen für den Zeitbedarf.

(17) Zu S. 38. Schätzung der Einsinkungstiefe der Kontinente in das geschmolzene Magma. Beim Schmelzpunkt des Basalts (1150°) ist die Dichte des geschmolzenen Basalts etwa 12% kleiner als die des kristallisierten. In den tiefen Magmaschichten der Erdhülle ist der Unterschied aber kleiner, die Kompressibilität des flüssigen Basalts bedingt eine nicht unwesentliche Zunahme seiner Dichte unter den hohen Drucken, denen er ausgesetzt ist. Joly rechnet

*) Diese von Joly eingesetzten Werte sind etwas verschieden von den auf S. 57 gebrachten, den Angaben von Meyer und v. Schweidler entnommenen Zahlen. Um den Leser beim Einsehen der Originalliteratur nicht zu verwirren, ist eine Umrechnung nicht erfolgt. Unter Verwendung der Meyer-Schweidlerschen Werte käme die Wärmeproduktion pro Gramm Basalt etwa 15% größer heraus.

daher mit einem Dichteunterschied von 7% zwischen dem festen und dem geschmolzenen Basaltmagma.

Aus dem Verhältnis der mittleren Dichten der kontinentalen Gesteine (Granite) und des viskos-festen unterliegenden Magmas (Basalt) ergibt sich, daß die mittlere Eindringungstiefe der Kontinente in das feste Magma von der Dichte 3 etwa 26 km beträgt; der herausragende Teil ist 4,6 km. Zieht man hiervon die mittlere Tiefe der Ozeane mit 3,8 km ab, so erhalten wir eine mittlere Erhebung der Kontinente über den Spiegel der Ozeane von 0,8 km. Beim Schmelzen des Magmas sinkt nun dessen Dichte um 7%, von 3,0 auf 2,69. Solange der Boden der Ozeane noch dick ist, wird die hebende Kraft des spezifisch leichten Magmas noch nicht zur Geltung kommen können, wohl aber dann, wenn der Boden bis auf eine dünne Kruste abgeschmolzen ist. Ist die Kruste noch 6 km dick, dann tauchen die Kontinente etwa 20 km in das geschmolzene Magma ein, dessen Auftrieb 7% kleiner ist als das des festen. Sie sinken also 7% von 20 km = 1,4 km nach unten. Gegenüber einer früheren Erhebung der Kontinente über die Ozeane von 0,8 km, ergibt sich also nach dem Schmelzen des Magmas das Resultat, daß die mittlere Oberfläche der Kontinente jetzt 0,6 km unter Seehöhe zu liegen kommt: Alle niedrigen kontinentalen Erhebungen werden vom Meere überflutet.

Es erklärt sich hieraus das ungemein verbreitete Vorkommen fossiler Meerestiere auf unseren heutigen Festländern.

(19) Zu S. 39. Die Anzahl der „Revolutionen“. Nimmt man nach Joly die Dauer einer „Revolution“ mit 30—50 Millionen Jahren an und ihre Anzahl seit den Zeiten des Präkambriums mit sechs, dann erhält man für die Dauer der Oberflächengeschichte unserer Erde einen Wert von höchstens 300 Millionen Jahren.

Wie wir gesehen haben, ist das Alter der ältesten geologischen Schichten aber mindestens fünfmal so hoch; und wir können hieraus den Schluß ziehen, daß entweder die Dauer oder die Anzahl der erdgeschichtlichen Revolutionen unterschätzt worden ist. Holmes*) glaubt in der Tat Gründe für die Annahme zu haben, daß die Anzahl der Revolutionen wesentlich höher gewesen ist, als Joly annimmt, wobei allerdings ihre Intensität nicht immer so groß gewesen sein dürfte wie die der wenigen Hauptumwälzungen.

Wenn hier auch sicher noch sehr viel ungelöste Fragen späterer Beantwortung harren, so sehen wir doch, daß sich auch bei diesem Fragenkomplex ein ernsthafter Widerspruch gegen das angenommene Alter der Erdkruste nicht zu erheben braucht.

(20) Zu S. 40. Die kontinentalen Verschiebungen. Wegen der Bremswirkung, die das leichtbewegliche und der Anziehung des Mondes folgende geschmolzene Magma auf die darüberliegende feste Erdkruste ausübt, werden bei der von Westen nach Osten verlaufenden Erdrotation die äußeren Teile der Erdkruste im Verhältnis zum inneren Erdkern etwas zurückbleiben; sie erfahren eine langsame ost-westliche Verschiebung. Der Betrag dieser Verschiebung ist aber nicht überall der gleiche. Die Hauptbremswirkung der geschmolzenen Lavamassen erfolgt in ihren oberen Teilen, wo diese fast so dünnflüssig wie Wasser sind. Die tiefer gelegenen Schichten des Lavameeres, im Kontakt mit zäherem und festerem Material und auch unter der Wirkung größerer Druckkräfte stehend, werden schwerflüssiger und zäher sein und daher vermutlich nahezu die volle Geschwindigkeit der Rotation des Erdinnern mitmachen. Es läßt sich hieraus leicht erkennen, daß auf die tief in das Innere des Magmas eintauchenden Kontinente scherende Kräfte einwirken. Die

*) A. Holmes: Nature Bd. 116, S. 891. 1925.

oberen Teile werden stärker gebremst als die unteren. Die unteren erfahren daher einen von Westen nach Osten gerichteten Druck. Drehende Kräfte werden außerdem eintreten, wenn die Ausdehnung der Kontinente im Verhältnis ihrer Lage zum Äquator unsymmetrisch verläuft; denn am Äquator sind die Flutwirkungen des Magmas am größten, nach den Polen zu werden sie kleiner. Wenn nun — auf der Höhe einer Revolution — der Boden der Ozeane durch seine Ausdehnung und dessen Begleiterscheinungen geschwächt, wenn er durch das überhitzte Magma auf wenig Kilometer Dicke abgeschmolzen ist, dann ist die Möglichkeit gegeben, daß ganze Kontinente oder an Gebirgen reiche Teile von Kontinenten abgerissen werden und gegenüber der allgemeinen nach Westen verlaufenden Drift nach Osten verlagert werden. So mag Neu-Seeland von dem Mutterlande Australien losgelöst worden sein, die japanischen Inseln von Ostasien.

Die vor allem von Wegener in seinem Werke über die „Entstehung der Kontinente und Ozeane“ beschriebenen Wanderungen der Kontinente, ihre relativen Verschiebungen gegenüber dem Ozean finden unter den hier beschriebenen Gesichtspunkten eine zwanglose Erklärung.

Literatur.

Zusammenfassende Arbeiten über das Alter der festen Erdkruste und den Wärmehaushalt der Erde finden sich bei J. Joly: *Radioactivity and Geology*, London 1909 (287 S.); A. Holmes: *The age of the Earth*, London und New York 1913 (195 S.); R. W. Lawson: Über absolute Zeitmessung in der Geologie auf Grund der radioaktiven Erscheinungen, *Naturwissenschaften* Jg. 5, S. 429—469. 1917 (hier auch ein vollständiges Literaturverzeichnis bis 1917); T. C. Chamberlin u. a.: *The age of the Earth*. Ann. Report Smithsonian Inst. 1922, S. 241—275; H. Jeffreys: *The Earth*, Cambridge University Press, 1924 (278 Seiten).

Der Einfluß der Radioaktivität auf die Oberflächengestaltung der Erde wird ausführlich behandelt bei J. Joly: *The Surface History of the Earth*, Oxford, the Clarendon Press 1925 (187 Seiten).

Neuere Spezialarbeiten sind durch Literaturangaben zugänglich gemacht.

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Astronomische Miniaturen

Von

Elis Strömgren

Aus dem Schwedischen übersetzt

von

K. F. Bottlinger

Mit 14 Abbildungen. (96 S.) 1922. RM 2.50

Die Hauptprobleme der modernen Astronomie

Versuch einer

gemeinverständlichen Einführung in die Astronomie der Gegenwart

Von

Elis Strömgren

Aus dem Schwedischen übersetzt und in einigen Punkten ergänzt

von

Walter E. Bernheimer

Mit 31 Abbildungen im Text und auf zwei Tafeln. (110 S.) 1925. RM 4.80

Lehrbuch der Physik in elementarer Darstellung

Von

Arnold Berliner

Dr.-Ing. e. h., Dr. phil.

Dritte Auflage

Mit 734 Abbildungen. (655 S.) 1924. Gebunden RM 18.60

Entwicklungsgeschichte der modernen Physik

Zugleich eine Übersicht ihrer Tatsachen, Gesetze und Theorien

Von

Felix Auerbach

Mit 115 Abbildungen. (352 S.) 1923. RM 8.—; gebunden RM 10.—

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Das Atom und die Bohrsche Theorie seines Baues.

Gemeinverständlich dargestellt von **H. A. Kramers**, Dozent am Institut für Theoretische Physik der Universität Kopenhagen, und **Helge Holst**, Bibliothekar an der Königlichen Technischen Hochschule Kopenhagen. Deutsch von **F. Arndt**, Professor an der Universität Breslau. Mit 35 Abbildungen, 1 Bildnis und 1 farbigen Tafel. (199 S.) 1925.

RM 7.50; gebunden RM 8.70

Über den Bau der Atome. Von **Niels Bohr**. Dritte, unveränderte Auflage. Mit 9 Abbildungen. (60 S.) 1925. RM 1.80

Die Idee der Relativitätstheorie. Von **Hans Thirring**, a. o. Professor der Theoretischen Physik an der Universität Wien. Zweite, durchgesehene und verbesserte Auflage. Mit 8 Textabbildungen. (175 S.) 1922. RM 4.50

Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen. Elementar dargestellt von **Max Born**. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 135 Textabbildungen. (Bildet Band III der „Naturwissenschaftlichen Monographien und Lehrbücher“. Herausgegeben von der Schriftleitung der „Naturwissenschaften“.) (280 S.) 1922.

Gebunden RM 10.—

Die Bezieher der „Naturwissenschaften“ erhalten die Monographien mit einem Nachlaß von 10%.

Der Aufbau der Materie. Drei Aufsätze über moderne Atomistik und Elektronentheorie. Von **Max Born**. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 37 Textabbildungen. (92 S.) 1922. RM 2.—

Die Grundlagen der Relativitätstheorie. Populärwissenschaftlich dargestellt. Von Dr. **Rudolf Lämmel**, Zürich-Meilen. Mit 32 Textfiguren. (166 S.) 1921. RM 2.60

Kausalgesetz und Willensfreiheit. Öffentlicher Vortrag, gehalten in der Preußischen Akademie der Wissenschaften am 17. Februar 1923. Von **Max Planck**. (52 S.) 1923. RM 1.50