

in den Mechanismus gebirgsbildender Bewegungen in den Ostalpen. Der eigentliche Zweck der vorstehenden Erörterungen aber wird erfüllt, wenn die ostalpine Aufnahmsgeologie aus anderer Formulierung vorhandener oder vielleicht auch neuartiger Fragestellung weitere Anregungen schöpfen kann.

R. W. van Bemmelen (Utrecht), Die endogene Energie der Erde. (Amer. Journ. of Science, Vol. 250, Februar 1952.) Übersetzung: H. Küpper.

Zusammenfassung.

Im Kern der Fragestellung steht die Quelle und der Charakter der endogenen Energie der Erde. Ist diese thermischen oder chemischen Ursprungs? Das thermische Konzept mündet in eine Gruppe geophysikalischer und geotektonischer Hypothesen, in welchen Konvektionsströmungen eine wichtige Rolle spielen. Die Vorbedingung für Konvektionsströmungen ist chemische Homogenität des Substrates, in welchem die Strömungen vor sich gehen. Moderne kosmochemische und geochemische Erwägungen jedoch und ebenfalls seismologische Beobachtungen scheinen in Widerstreit mit der genannten Vorbedingung zu sein. Aus diesem Grunde können die Hypothesen, welche ausschließlich die thermischen Quellen der endogenen Energien in Betracht ziehen, vielfältigen Aspekten der geologischen Evolution nicht gerecht werden.

Andererseits zeigen geologische Beobachtungen, daß chemische Prozesse auf ganz normale und systematische Weise mit tektonischen Prozessen verknüpft sind (Vulkanismus, Plutonismus, Metamorphose). Es ist zu erwägen, ob die kosmische Abkühlung der Erde, möglich eine plötzliche Abkühlung infolge der Abtrennung des Mondes in einem frühen Entwicklungsstadium, den Silikatmantel der Erde aus seinem chemischen Gleichgewicht gebracht hat. Das Streben nach Wiederherstellung des physikalisch-chemischen Gleichgewichtes, besonders im äußeren Teil des Silikatmantels, auf dem Wege über Kettenreaktionen, aber auch wieder verzögert durch Unterkühlung, wird als die fundamentale Quelle der endogenen terrestrischen Energie betrachtet, welche wirksam erscheint seit den großen Umwälzungen, die am Anfang der Entwicklung unseres planetarischen Systems stehen.

Einleitung.

Die Quelle und Herkunft der endogenen Kräfte ist eines der fundamentalen Probleme der Geologie. Seit der Entstehung unseres Planeten haben sich Deformationen und Transformationen im Silikatmantel der Erde abgespielt. Diese Prozesse dauern auch heute in manchen Gebieten fort und äußern sich in Erdbeben, gravimetrischen und magnetischen Anomalien. Jegliche Betrachtung über Bedeutung und Wechselbeziehung geologischer und geophysikalischer Phänomene leitet über zur Fragestellung nach dem Ursprung der endogenen Energie.

Nur die Auswirkungen dieser Energie sind unserem Studium zugänglich. Der Geologe kann heute mit Sicherheit sagen, daß vulkanische und tektonische Vorgänge ohne merkbare Abnahme der Intensität mindest während eines Zeitraumes von 2×10^9 Jahren abrollen. In noch früheren Zeiten — vom Ursprung unseres Planeten vor etwa 3.35×10^9 Jahren bis zum Beginn der geologischen Zeitrechnung im engeren Sinne — mag die Erde heißer gewesen sein und die vulkanischen Vorgänge mögen einen heftigeren Ablauf gezeigt haben (pyrosphärisches und anhydriertes Stadium der Erdentwicklung); direkte Beobachtungen zur Stützung dieser Möglichkeit liegen jedoch nicht vor.

Welcher Art ist nun die terrestrische Energie, welche die geologische Entwicklung durch diese immensen Zeiträume im Gang gehalten hat?

Quellen der Energie.

Die terrestrische Energie ist ein Erbe noch aus dem protoplanetaren Entwicklungsstadium. Nachdem sich unser Planet von der Sonne getrennt hatte (oder nachdem er sich aus einer protoplanetarischen Gasscheibe mit der Sonne als Mittelpunkt kondensiert hatte) und der Mond ausgestoßen worden war, haben keine kosmischen Ereignisse mehr in die Entwicklung eingegriffen. Seit der Geburt der Erde sollte sich der Vorrat an freier Energie durch Strahlung ständig vermindert haben, während ein Bruchteil derselben durch tektonische und magmatische Vorgänge aufgebraucht worden ist.

Energie kann auf der Erde auf dreierlei Weise gespeichert und freigegeben werden: 1. durch thermische Schwingungen der Atome, genannt „Interne Wärme“; 2. durch spontane Kernspaltung der natürlichen radioaktiven Elemente; 3. durch interatomare physikalisch-chemische Kräfte.

Außer diesen Reserven an terrestrischer Energie besteht natürlich noch die potentielle Energie des allgegenwärtigen Gravidationsfeldes sowie die kinetische Energie der Erdrotation.

Der geothermische Gradient (geoth. Tiefenstufe) beweist, daß das Erdinnere heißer ist als der umgebende Raum. Im Laufe der Zeit wird sich deshalb die Erde abkühlen, wenn der Wärmeverlust durch den Wärmestrom zur Oberfläche und anschließende Ausstrahlung nicht kompensiert wird durch andere Quellen thermischer Energie. In der klassischen Kontraktionstheorie ist die Annahme einer schrittweisen Abkühlung eingebaut. Diese Theorie jedoch in ihrer ursprünglichen und einfachen Form der allgemeinen Schrumpfung hat ihre Bedeutung verloren seit der Entdeckung der radioaktiven Wärme, der Existenz enormer Schubmassen, der Erkenntnis von Spannungserscheinungen in der Erdkruste (z. B. die afrikanischen Grabenbrüche), der Existenz alter Vergletscherungen usw. Trotzdem ist eine partielle Abkühlung möglich und sie kann zu Konvektionsströmungen in der Erdkruste führen; diese Auffassung als Ausgangspunkt eines geotektonischen Konzeptes haben sich zahlreiche Geologen zu eigen gemacht.

Die Entdeckung der radioaktiven Erwärmung hat die Möglichkeit eröffnet, daß man es an Stelle von Abkühlung mit lokaler Erwärmung zu tun haben könne. Die beim Atomzerfall sich ergebende Energie wird in den frühen Stadien der irdischen Entwicklung beträchtlich gewesen sein; die heutigen natürlichen radioaktiven Elemente dagegen sind die Ventile, durch welche diese Art von Energie nur sehr zögernd entweicht. Außerdem scheinen sich diese Elemente in der äußersten Rinde des Silikatmantels angereichert zu haben; denn sonst würde der geothermische Gradient rascher zunehmen.

Es sind in letzter Zeit Versuche gemacht worden, die endogenen Phänomene durch Kernreaktionen bei Bildung neuer Elemente zu erklären. Aber diese Hypothesen sind nicht in Übereinstimmung mit dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Bild des Universums. Natürlich sind alle Elemente durch Kernreaktionen entstanden, aber diese setzen sich nicht mehr fort unter den relativ niedrigen Druck- und Temperaturbedingungen der planetarischen Phase (ausgenommen jene Elemente, die beim Zerfall der natürlichen radioaktiven Elemente entstehen).

Wenn aber ungleichmäßige Erwärmung durch Radioaktivität als die grundlegende Quelle der endogenen Aktivität angenommen wird, dann könnten sich auch hieraus Konvektionsströmungen ergeben und es würde diese Annahme in die gleiche Gruppe von Hypothesen münden wie partielle Abkühlung.

Interatomare Prozesse als dritte Möglichkeit sind eine mächtige Quelle interner Energien. Gewöhnlich sind diese Kräfte gebunden in ausgeglichenen physikalisch-chemischen Systemen, die dadurch eher als potentiell, wie greifbar dynamisch gelten müssen. Wenn jedoch das statische Gleichgewicht gestört wird, können die interatomaren Kräfte zu allen orogenetischen Vorgängen leiten.

Die fundamentale Vorbedingung zur Entbindung dieser Energien ist die Möglichkeit zur Diffusion (Ausbreitung) nach physikalisch-chemischen Gradienten (Gefällsstufen), wie Druck, Temperatur, elektrisches und magnetisches Feld. Wenn eine derartige Ausbreitung im festen Zustand (kristallin oder amorph) möglich ist mit einer Geschwindigkeit in der Größenordnung geologischer Perioden und Epochen, dann werden sich wohl wesentliche Kettenreaktionen ergeben.

Es scheint, daß die klassische Kontraktionstheorie für endogene Vorgänge keine adäquate Erklärung geben kann; es liegt jenseits der Absicht dieses Aufsatzes, die Vor- und Nachteile der genannten Theorie zu diskutieren. Konvektionsströmungen jedoch — entweder im Gefolge partieller Abkühlung oder partieller Erwärmung — sind heute die Grundlagen aller theoretischen Erklärungen. Die Voraussetzungen für diese Konzepte werden im nächsten Abschnitt besprochen. Danach wird für die Wichtigkeit der physikalisch-chemischen Reaktionen als Quelle der endogenen Energie eingetreten.

Konvektionsströmungen

Konvektionsströmungen im Silikatmantel stellt man sich vor als Folge von umkehrbaren Dichteänderungen im Zusammenhang mit ungleicher Abkühlung oder Erhitzung. Derart werden sie als einfacher thermischer Prozeß aufgefaßt.

Die fundamentale Vorbedingung für größere Konvektionsströmungen ist die chemische Homogenität des Substrates. Vening-Meinesz (1934, S. 55) bemerkt ausdrücklich: „Wenn keine homogene Unterlagerung der Kruste bestehen würde, das ist falls die Dichte abwärts allmählich zunehmen würde, wäre keine Konvektion möglich“. Es soll im folgenden erst die Gültigkeit dieser Voraussetzung der Konvektionsströmungen diskutiert werden.

Wenn man ausgeht von der mittleren Dichte der Erde (5.527 g/cm^3), vom Trägheitsmoment unseres Planeten ($8.07 \times 10^{44} \text{ g/sec}^2$), seinem mittleren Radius ($6.371 \times 10^8 \text{ cm}$) und der angenäherten Tiefe der seismischen Grenze zwischen Silikatmantel und Kern ($2.9 \times 10^9 \text{ cm}$), so ergibt sich nur eine begrenzte Wahl für die Dichteverteilung. Nach Haalck dürfte man mit Dichten zwischen 4 und 5 bei 1200 km zu rechnen haben, was der Tiefe einer angenommenen seismischen Diskontinuitätsfläche entsprechen würde, und zwischen 5 und 9 bei 2900 km, was wiederum die Sohle des Silikatmantels wäre. Wenn dieser homogen wäre, dann würde sich die Dichtenzunahme nach der Tiefe von 3.4 bis 5--9 ausschließlich als Resultat der Druckzunahme darstellen. Diese erreicht einen Wert von $1.5 \times 10^6 \text{ atm.}$ an der Basis des Silikatmantels. Andererseits aber würde die Temperaturzunahme einen gegenteilig orientierten Effekt haben, die zur Abnahme der Dichte mit zunehmender Tiefe leiten würde.

Es ist a priori nicht unmöglich, daß durch Druckzunahme, selbst wenn ihr Temperaturzunahme entgegenwirkt, die Dichte der Silikate das Zwei- bis Dreifache dessen erreicht, was an der Oberfläche bekannt ist. Solche wesentliche Dichtezunahmen können nicht durch Laboratoriumsexperimente bestimmt werden, noch weisen bisher thermodynamische Extrapolationen in dieser Richtung. Es ist deshalb die Voraussetzung der chemischen Homogenität eine anfechtbare, zweifelhafte Annahme; und sie erfordert eine gewisse Stützung aus anderen Richtungen, bevor sie als wahrscheinliche Grundlage geophysikalischen Schlußfolgerungen zugrunde gelegt werden kann. Jüngst ausgeführte Studien an Meteoriten von Brown und Patterson und auch geochemische Studien von Barth, Ramberg und anderen sind in diesem Zusammenhang wichtig.

Brown und Patterson (1948) haben die Zusammensetzung der Silikat-Meteorite studiert unter stärkerer Berücksichtigung der quantitativen Verhältnisse, als dies bisher geschehen ist. Diese Arbeiter zeigen, daß: „...wenn man annimmt, daß die beobachtete Verteilung der Elemente eine Gleichgewichtsverteilung darstellt, dann muß dieses Gleichgewicht bei Temperaturen in der Größenordnung von 3000° C und Drucken in der Größenordnung von 10^5 — 10^6 atm. erreicht worden sein.

Weiterhin ergibt sich, daß die Bedingungen, zu welchen das Gleichgewicht erreicht wurde, von Meteorit zu Meteorit in der Art wechseln, daß einem höherem Gehalt an Metall-Phasen, höhere Temperatur- oder Druckbedingungen entsprechen. Alle Anzeichen weisen darauf hin, daß der Ursprung der Meteoriten in einem Planeten zu suchen ist, welcher der Erde in seiner physikalisch-chemischen Charakteristik ähnlich ist“.

Bauer (1947) schätzt bei einer Revision der Panethschen Daten das Alter der Meteoriten auf 3.4×10^9 Jahre über die Helium-Methode. Dies ist nach der Schätzung von Holmes (1947) in sehr guter Übereinstimmung mit dem Alter der Erde nach der Blei-Isotopen-Methode (3.35×10^9 Jahre). Die Meteoriten entstanden deshalb wahrscheinlich im Beginnstadium unseres Sonnensystems. Kuiper (1951) nimmt an, daß sie entstanden bei einem Zusammenstoß planetarischer Massen, die sich im Ringe der Planetoiden zwischen Mars und Jupiter befanden. Die Ideen von Hoyle und Lyttleton führen zu einer ähnlichen Auffassung über den Ursprung der Meteoriten.

Wenn also die Zusammensetzung der Meteoriten in einem gewissen Sinne die physikalisch-chemischen Gleichgewichtsbedingungen im Mutterplaneten wiedergibt, so müssen diese kurz nach ihrer Entstehung erreicht worden sein. Da nun die physikalisch-chemischen Bedingungen in diesen Mutterplaneten vergleichbar sind denen unserer Erde, so gilt die genannte Folgerung auch für den Silikatmantel der Erde; auch in diesem muß sich abwärts eine Verschiebung der chemischen Zusammensetzung ergeben als Folge der Druck- und Temperaturgradienten. Die Kurven, welche die Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Steinmeteoriten darstellen, wie sie von Brown und Patterson auf Grund der variablen Metallphase entworfen wurden (1948, Fig. 7, 8), leiten durch Extrapolation über zu den mittleren Werten der Zusammensetzung der Plateaubasalte und der Mittel für alle Eruptivgesteine. Dies ist eine weitere Stütze dafür, daß diese Kurven bis zu einem gewissen Grad ein Abbild geben der chemischen Zusammensetzung des Silikatmantels der Erde in größeren Tiefen. Auf diesem Wege ergibt sich, daß die Meteoritenstudien von Brown und Patterson die Auffassung stützen, daß die Tiefenzunahme der Dichte mindestens zum Teil eine Folge von Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung ist; und dies wiederum widerspricht der Voraussetzung für Konvektionsströmungen.

Diese Hinweise wurden durch Studien von Ramberg (1948) und Barth (1948) bekräftigt. Letzterer wies auf die regelmäßige Abnahme des durch Sauerstoff eingenommenen Volumens nach der Tiefe. Diese Abnahme bewegt sich von 96.87% in den Ozeanen (Hydrosphäre), 92.12% granitischer „Ichor“, 91.83% in den durchschnittlichen Eruptivgesteinen, 91.11% in den durchschnittlichen Plateaubasalten, bis zu 90.00% im Olivin der Peridotitschale. Barth schließt, daß „diese Abnahme des Sauerstoffvolumens mit der Tiefe einer Annäherung an das thermodynamische Gleichgewicht entsprechen. Wenn hoch oxydierte Oberflächengesteine in große Tiefen versenkt wurden, so wird der Sauerstoff aus dem Gitterbau heraus-

gepreßt und kehrt zur Oberfläche zurück. Aus diesem Grunde können die tieferen Teile unserer Erdkugel nicht oxydieren“.

Die chemische Zusammensetzung der randlichen Partie des Silikatmantels, genannt Tektonosphäre, verändert sich deshalb mit der Tiefe nach dem thermodynamischen Gleichgewicht. Und es ist sehr gut möglich, daß derartige mehr oder weniger allmähliche Veränderungen in der Zusammensetzung auch in den tieferen Teilen der Erdkruste stattfinden. Es ist deshalb die moderne Kosmochemie und Geochemie nicht in Übereinstimmung mit der Grundvoraussetzung der Konvektionsströmungen, nämlich mit einer chemischen Homogenität des Substrates.

Es gibt jedoch noch ein anderes schwerwiegendes Argument gegen Konvektionsströmungen, das sich auf seismologische Evidenz stützt. Der Annahme nach repräsentiert die seismische Mohorovičić-Diskontinuität in einer Tiefe von etwa 40 km die Basis der Kristallinschale. Unter dieser Diskontinuität sollen sich die Konvektionsströme bewegen und dabei einen mitschleppenden Zug auf die überlagernden Krustenteile ausüben. Mit anderen Worten, die Silikate oberhalb dieser seismischen Grenzfläche sollten sich im kristallinen Stadium, jene unterhalb im amorphen Stadium befinden. An der Grenzfläche jedoch nimmt die Geschwindigkeit der longitudinalen Wellen mit einem plötzlichen Sprung zu von 6,5–7 km/sec. auf 8,1–8,2 km/sec. Wo dieser rapide Geschwindigkeitswechsel stattfindet, liegt auch ein Wechsel vor von weniger starrem, leichter zusammendrückbarem Gestein oben, zu mehr starrem, schwieriger zusammendrückbarem Gestein unten. Laboratoriumsexperimente über elastische Eigenschaften der Gesteine, die Dichte-Verteilung in der Tektonosphäre und petrographische Erwägungen machen ebenfalls wahrscheinlich, daß die Masse oberhalb der genannten Grenzfläche als amorphe Silikatschmelze basaltischer (gabbroider) Zusammensetzung aufzufassen ist, unterhalb der Grenzfläche dagegen als im kristallinen Zustand befindlich von ultrabasischer Zusammensetzung (peridotitisch). Diese allgemein angenommene Deutung ist gerade das Gegenteil dessen, was vom Standpunkt der Anhänger der Hypothese der Konvektionsströmungen zu erwarten wäre.

Es besteht schließlich noch eine weitere Schwierigkeit auf Grund seismologischer Tatsachen. Gutenberg (1950 und früher) weist darauf hin, daß in einer Tiefe von etwa 80 km die Geschwindigkeit der seismischen Wellen leicht abnimmt und daß sie in etwa 150 km wieder zuzunehmen beginne. Die nächstliegende Erklärung dieser Abnahme ist die, daß zwischen 80 und 150 km Tiefe die kristalline Peridotitschale nach unten übergeht in die geschmolzene, amorphe Masse des „Sifema“. Diese Abnahme ist deshalb auch in Widerstreit mit dem Konzept der Konvektionsströmungen, da durch den Umschichtungseffekt dieser Strömungen alle Unregelmäßigkeit ausgeglichen, das Substrat auf diese Art chemisch als auch physikalisch homogen gestaltet hätte werden sollen.

Weder geochemische noch seismologische Betrachtungen stützen also die Grundvoraussetzungen für Konvektionsströmungen. Trotzdem, alle diese Bedenken sind indirekter Art, ausgehend vor allem

von Ableitungen und Extrapolationen. Gibt es nun vielleicht doch direkte geologische Beobachtungen, die trotzdem für wesentliche Konvektionsströmungen in der Tiefe sprechen?

Differentielle vertikale Bewegungen, die sich mit der gleichen Tendenz über lange Zeiträume bis zu 100 Millionen von Jahren fortgesetzt haben, sind ein wesentlicher Zug der geologischen Entwicklung. In dem sehr wertvollen Symposium über mögliche zukünftige Erdölprovinzen in Nordamerika (A. A. P. G. Vol. 35, Nr. 2, 1951) sind die allgemeinen Züge behandelt, welche den steigenden Gebieten der Erdkruste und auch den angrenzenden absinkenden Gebieten eigen sind — z. B. das Ansteigen der Appalachen und das Absinken des Gulf of Mexico. Steigen und Absinken kann durch das Hineinspielen der Isostasie bis zum 10fachen gesteigert werden. Massen mit einer Dichte von 2,75 werden durch die Erosion von den steigenden Gebieten entfernt sie werden teilweise als Sedimente mit einer mittleren Dichte von 2,5 in die angrenzenden sinkenden Tröge wieder abgelagert. Die Isostasie kann hier jedoch nicht die letzte Ursache sein, denn die steigenden Gebiete werden schwerer als die absinkenden. Innere Kräfte müssen dieses Spiel im Gang halten.

Was ist nun die Ursache dieser differentiellen vertikalen Bewegungen mit einer während geologischer Epochen gleich anhaltenden Entwicklungstendenz? Es kann sein, daß es die Auswirkung von Konvektionsströmungen im Untergrund ist, mit sich nach oben bewegenden Ästen unter den aufsteigenden Gebieten und sich nach abwärts bewegenden Ästen unter sinkenden Gebieten. Der sich aufwärts bewegende Ast eines Konvektionsstromes sollte dann der heißere sein in dem die thermische Expansion eine Abnahme des spezifischen Gewichtes verursacht hat; der sich abwärts bewegende Ast sollte kühler sein mit höherem spezifischen Gewicht als Folge der thermischen Kontraktion.

Gegen dieses Konzept wiederum liegen ernste Bedenken vor, in Hinblick auf die Energie, welche den Prozeß im Gang halten soll. Wie bereits angedeutet, könnte dies entweder partielle Erwärmung sein als Folge von Radioaktivität oder partielle Abkühlung durch Wärmeleitung durch die Erdkruste und Ausstrahlung in den Raum.

Im Falle der partiellen Erwärmung könnte diese nicht auf eine ungleiche Verteilung der radioaktiven Elemente zurückgeführt werden, dadurch, daß etwa die aufsteigenden Äste stärker radioaktiv seien als die absteigenden? Denn die Konvektionsströmungen, dauernd oder mit Unterbrechungen tätig während unendlich langer Zeiträume, sollten doch wohl das Substrat zu vollständiger chemischer Homogenität „verrührt“ haben. Wenn aber das Substrat homogen angenommen wird, könnte man vermuten, daß die obersten Krustenfelder über den aufsteigenden Ästen mehr Quellen radioaktiver Energie enthalten als über den absinkenden Ästen. Aber im Laufe der Zeit dürfte wohl Erosion und Sedimentation diese ungleiche Verteilung wieder ausgeglichen haben, indem die radioaktiven Elemente von den aufsteigenden Gebieten abgetragen und in die angrenzenden absinkenden abgelagert werden.

Im Falle partieller Abkühlung ergibt sich die Frage, warum die Abkühlung sich unter einem absinkenden Krustenstreifen deutlicher äußern solle, trotz der Tatsache, daß dieser bedeckt ist von einer immer dicker werdenden Auflaste von Sedimenten.

Es scheint nach den vorstehenden Betrachtungen, daß mit Hilfe von Konvektionsströmungen — entweder auf dem Wege partieller Erwärmung oder partieller Abkühlung — das kontinuierliche „Ab und Auf“, wie es sich im Ablauf lange dauernder Krustenbewegungen abzeichnet, nicht zufriedenstellend erklärt werden kann. Wir müssen uns umsehen nach anderen, langsamen, aber lange dauernden Vorgängen im Silikatmantel. Könnte es sein, daß diese nicht thermischer, sondern chemischer Art sind? Diese Möglichkeit wird im folgenden näher betrachtet.

Physikalisch-chemische Kettenreaktionen

Die Schwerkraft ist eine überragende und dauernd wirkende Kraft, deren Ausschaltung nicht denkbar ist. Abweichungen vom gravimetrischen Gleichgewicht erzeugen Spannungsfelder, die, wenn bestimmte Grenzen überschritten werden, Massenverlagerungen und tektonische Deformationen zur Folge haben. Es handelt sich also darum, zu untersuchen, wie Abweichungen vom gravimetrischen Gleichgewicht entstehen können.

Es bestehen zwei Möglichkeiten: entweder bleibt die Massenverteilung konstant und das gravimetrische Feld ändert sich durch kosmische Kräfte; oder es sind Veränderungen in der Verteilung der Massen, was wiederum Abweichungen vom gravimetrischen Gleichgewicht zur Folge hat.

Die erste Möglichkeit ist der gedankliche Ausgangspunkt geophysikalischer Hypothesen, die sich stützen auf Veränderungen der Rotationsgeschwindigkeit und Bahnneigung, der Gezeiten, Verlagerung der Rotationsachsen u. dgl. Diese primären Deformationsursachen mögen für die älteren, mehr turbulenten Phasen der Erdentwicklung von Bedeutung gewesen sein, z. B. in Zusammenhang mit der Abtrennung des Mondes, jedoch nicht für die Phasen der geologischen Erdentwicklung im engeren Sinn, auf welche Lyells Aktualitätsprinzip Anwendung finden kann.

Für die geologische Entwicklung im engeren Sinne, zumindest für die tektonischen Bewegungen der Gegenwart müssen wir das Gravitationsfeld der Erde als konstant annehmen, so daß Veränderungen in der Massenverteilung als Ursache für Abweichungen vom Schwerefeld betrachtet werden müssen. Es ist natürlich deutlich, daß das gegenwärtige tektonische Relief mit seinen kontinentalen und orogenen Hochs und ozeanischen Tiefs keinem Schwere-Gleichgewicht entspricht.

Wir können deshalb unser Problem auf die Frage zuspitzen, wie Abweichungen vom Schwere-Gleichgewicht entstehen. Dies ergibt sich, wenn die Dichte der Massen sich in bestimmten geometrischen Positionen ändert. Es ist für die geotektonische Auswirkung belanglos, ob derartige Veränderungen der Dichte im thermodynamischen Sinn reversibel sind oder nicht. Es können sich so reversible Aus-

dehnungen oder Zusammenziehungen der Masse ergeben als Folge von Temperatur- und Druckänderungen, wie dies in den thermischen geotektonischen Hypothesen angenommen wird. Möglicherweise können die Veränderungen der Dichte auch nicht-umkehrbar sein, wenn sie einen mehr permanenten chemischen Charakter tragen.

Kennen wir nun geologische Vorgänge, welche von derartigen chemischen Dichte-Veränderungen begleitet sind? Die Bildung der Eruptivgesteine und die Regional-Metamorphose sind geochemische Vorgänge, die von Dichteveränderungen begleitet sind. Regional-geologische Studien haben bewiesen, daß eine enge und systematische Verknüpfung zwischen tektonischen und magmatischen Vorgängen besteht, wie z. B. das Steigen und Sinken der Migmatit-Front (Wegmann, 1935), die Gestaltung plutonischer Körper (H. und E. Cloos), die Verknüpfung von bestimmten petrographischen Provinzen mit bestimmten Stadien der orogenen Entwicklung (van Bemmelen, 1950a). Wir können deshalb sicher sein, daß chemische und physikalische Eigenschaften der Erdkruste sich im Laufe der geologischen Evolution ändern. Nach den von Grundtatsachen ableitbaren Hinweisen scheint die Geschichte unseres Planeten ein langes und kompliziertes Aufeinanderfolgen von Deformationen und Transformationen der Erdkruste zu sein auf dem Wege über physikalisch-chemische Kettenreaktionen.

Diese Kettenreaktionen gehen vor sich nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik; sie sind deutlich gerichtet und nicht umkehrbar. Der Autor (1949 b, p. 732) hat die allgemeine Linie der Vorgänge folgendermaßen skizziert: Der kosmische Prozeß der Abkühlung der Erde verursacht einen Energiestrom vom heißeren, inneren, zu den äußeren Teilen des Planeten. Es ist dies jedoch kein einfacher thermischer Prozeß. Vor der endgültigen Ausstrahlung und Zerstreung in den Raum durchwandert auf dem Weg zur Oberfläche die freie Energie eine ganze Reihe von verschiedenen Bedingungen. Vor allem löst das Temperaturgefälle exotherme Kettenreaktionen aus, gefolgt von einem Strom disperser, atomarer und ionisierter Massen, wodurch die Zusammensetzung der Schalen der Erdkruste chemisch eingeregelt wird. Diese physikalisch-chemischen Prozesse verursachen Veränderungen in der Dichte und als Folge ihrer ungleichen Verteilung verursachen sie auch Störungen des hydrostatischen Gleichgewichtes. Gerade dieser Gleichgewichtstörende Effekt der physikalisch-chemischen Prozesse führt aber auch periodisch zu gegenläufiger Reaktion, die den Charakter konzentrierter Massenbewegungen annehmen können. Diese das Gleichgewicht wieder anstrebenden Bewegungen in der Tiefe verursachen differentielle vertikale Bewegungen der Erdkruste, die wir primäre Tektogenese nennen.

„Diese differentiellen Vertikalbewegungen der Erdkruste stören ihrerseits das Schwere-Gleichgewicht der äußeren Kruste und sedimentären Epidermis. Die darauf wieder folgenden Ausgleichsreaktionen werden als sekundäre oder gravitative Tektogenese klassifiziert.“

Wir sehen also, daß die chemische Blickrichtung betreffend den Ursprung der endogenen Energie zu einer bikausalen Interpretation der Deformationen der Erdkruste führt. Die ganz großen Züge im Relief der Erde, wie Gebirgsketten, Geosynklinalen, Plateaus und Becken sind die Folge differentieller Vertikalbewegungen (primäre Tektonogenese); Faltung und Schubbewegungen in der Richtung von Tief-Zonen entsprechen im großen dem Abgleiten von angrenzenden, höher liegenden Krustenteilen (sekundäre Tektonogenese).

Vom Standpunkt dieses Vorstellungsbereiches geschen ist es nicht nötig, hypothetische Kräfte tangentieller Zusammenpressung in der Erdkruste anzunehmen, welche für die Hauptzüge des Reliefs verantwortlich wären. Die Verfrachtung von Massen in der Tiefe und in der Kruste als Folge thermodynamischer und physikalisch-chemischer Gefällsstufen (Gradienten) dürfte verantwortlich sein für die Auf- und Abbewegungen an der Erdoberfläche. Die allgegenwärtige Gravitation andererseits könnte verantwortlich sein für die sich ergebenden Faltungs- und Schubbewegungen als Folge von Gleitung. Alpine Geologen der Schweiz und Frankreich — Lugeon, Gigonoux und andere — sind überzeugt von der Wichtigkeit des Prinzips des „écoulement par gravité“.

Der Autor konnte übrigens in seiner Synthese über die Geologie von Indonesien zeigen — ein Gebiet, das 4% der Erdoberfläche einnimmt —, daß das bikausale Konzept eine harmonische Einsicht gewährt in das komplizierte Geflecht gegenseitiger Beziehungen der beobachteten tektonischen, magmatischen und geophysikalischen Phänomene im Malaiischen Archipel. Die sich dort ergebenden Grundlinien orogener Entwicklung, abgeleitet aus den geologischen Grundtatsachen dieses Gebietes, dürften von mehr als lokaler Bedeutung sein.

Ein Punkt verdient besondere Aufmerksamkeit, und zwar der Zeitpunkt des Einsetzens der kosmischen Abkühlung, welche den Anstoß zu diesen komplizierten physikalisch-chemischen Kettenreaktionen gab. Denn es ist nicht erforderlich, daß die Reaktionen unmittelbar auf die Abkühlung folgten. Ein beträchtliches Intervall, ein zwischengelagertes statisches Ruhestadium, etwa entsprechend einer Phase unterkühlten Glases mit potentiellen physikalisch-chemischen Energien, ist durchaus möglich.

Eine Kalkulation des gegenwärtigen Wärmehaushaltes der Erde weist aus, daß ein Gleichgewicht bestehen dürfte zwischen der entstehenden radioaktiven Wärme und dem Wärmestrom zur Oberfläche (Nawijn, 1950). Deshalb dürfte gegenwärtig kaum eine Abkühlung der Erde vor sich gehen, wogegen die endogenen Kräfte noch sehr aktiv sind, z. B. in Indonesien und im Karibischen Gebiet.

Die Abkühlung jedoch, welche den Silikatmantel der Erde aus seinem physikalisch-chemischen Gleichgewicht gebracht hat, könnte ganz gut an den Beginn der geologischen Entwicklung verlegt werden. Wenn sich während der turbulenten Periode der Entwicklung von einer proto-planetarischen Gassphäre zu einem festen Planeten eine Katastrophe zugetragen hätte, welche einen plötzlichen Verlust ther-

mischer (-freier) Energie und Unterkühlung des äußeren Teiles des Silikatmantels verursachte, wäre es ganz gut vorstellbar, daß die physikalisch-chemischen Kettenreaktionen mehr oder weniger verzögert, vielleicht sogar ganz zum Stillstand gebracht wurden durch die Zunahme der Viskosität. Ein derartiger Prozeß der „Entglasung“ dieses Glasmantels könnte sogar in einem derartigen Ausmaß verzögert sein, daß er noch nicht einmal heute nach einem Intervall von Billionen von Jahren zum Stillstand gekommen ist.

Ein so gearteter plötzlicher Verlust freier thermischer Energie fand möglicherweise im pyrosphärischen Stadium der irdischen Evolution statt, als ein Teil des Silikatmantels durch verdampfte Silikate und Oxyde ausgeblasen wurde (van Bemmelen, 1948, 1949 a). Jenseits der Grenze von Roche nahm dieser ausgestoßene Teil des Silikatmantels als Folge seines eigenen Schwerfeldes eine sphärische Form an und unser neugeschaffener Satellit zeigte anfänglich archaeo-vulkanische Aktivität, ähnlich derjenigen auf der Oberfläche der Erde in diesem Stadium. Rasche Abkühlung jedoch brachte den lunaren Vulkanismus zum Stillstand und noch am heutigen Tag zeigt das erstarrte Antlitz des Mondes die Züge der Paroxysmen, die seine Geburt begleiteten. Sehr wahrscheinlich schlummern physikalisch-chemische Gradienten in Form potentieller Energien auch heute noch im Mond; sie scheinen jedoch nicht kräftig genug, um die Viskosität des lunaren Silikatmantels zu überwinden und Kettenreaktionen einzuleiten.

Im Gegensatz hiezu stellte sich auf der Erde als Folge ihres größeren Volumens und gefördert durch eingeschlossene solare Gase (Wasserstoff) an einigen Stellen ein langsam wirkendes Streben nach physikalisch-chemischer Stabilisierung ein. Dieser Vorgang der Wiederherstellung des physikalisch-chemischen Gleichgewichtes wurde vom Autor als „Hypo-Differentiation“ (Tiefendifferentiation) bezeichnet (1948). Es ist ein äußerst langsam wirkender Prozeß, vergleichbar der „Entglasung“ von Glas (Umwandlung vom amorphen in den kristallinen Zustand) und dürfte mit der Diffusion von Atomen und Ionen in der Tiefe einsetzen. Als Reaktion auf eine Abkühlung ist es ein exothermischer Prozeß, der, wenn einmal angelaufen, die Tendenz hat, sich fortzusetzen und zu verstärken. Es ist ein dauerndes Wechselspiel: auf der einen Seite die Bildung von Wärme durch exotherme Vorgänge, auf der anderen Seite der Verlust von Wärme durch Wärmeleitung und Vulkanismus. Die sich hieraus ergebenden Vorgänge bekommen so den Charakter von pulsierenden Spannungen und Entspannungen, verursacht durch Ladung und Entladungen (van Bemmelen, 1952). Und damit werden auch die äußeren Krustenteile durch diese physikalisch-chemischen Kettenreaktionen deformiert und transformiert, die als wahre Quelle der endogenen Energien der Erde angesehen werden können.

Literatur.

- Barth, T. F. W., 1948. The distribution of oxygen in the lithosphere; Jour. Geology, vol. 56, pp. 41—49.
 Bauer, C. A., 1947. Production of helium by cosmic radiation; Phys. Rev., vol. 72, p. 354.

- Brown, H. and Patterson, Cl. 1948. The composition of meteoritic matter, III: Phase equilibria, genetic relationships, and planet structure: *Jour. Geology*, vol. 56, pp. 85—111.
- Gutenberg, B., 1950. The structure of the earth's crust in the continents: *Science*, vol. 11, pp. 29—30.
- Heim, 1933. Energy sources of the earth's crustal movements: 16th Internat. Cong. Rpt., vol. 2, pp. 909—924.
- Holmes, A., 1947. The age of the earth: *Endeavour*, vol. 6, no. 23.
- Kuiper, G. P., 1951. On the origin of the solar system. In *Astrophysics*, Hynek, J. A., editor, McGraw-Hill Company, New York, pp. 357—424.
- Nawijn, A., 1950. De warmte balans van de aarde: *Chronica Naturae*, vol. 106, pp. 409—414.
- Ramberg, H., 1948. Radial diffusion and chemical stability in the gravitational field: *Jour. Geology*, vol. 56, pp. 448—458.
- van Bemmelen, R. W., 1933. The undation theory of the development of the earth's crust: 16th Internat. Geol. Cong. Rept., vol. 2, pp. 965—982.
- 1948. Cosmogony and geochemistry: 18th Internat. Geol. Cong. Rept., part II, pp. 9—21.
- 1949 b. The geology of Indonesia. Vol. IA, general geology; Vol. IB, portfolio; vol. 11, pp. 1—21.
- 1949 b. The geology of Indonesia. Vol. IA, general geology; Vol. IB, portfli; Vol. II, economic geology, State Printing Office (Martinus Nijhoff, agent), The Hague.
- 1950 a. On the origin of igneous rocks in Indonesia: *Geologie en Mijnbouw*, vol. 12, pp. 207—220.
- 1950 b. Gravitational tectogenesis: *Geologie en Miinbouw*, vol. 12, pp. 351—361.
- 1952. De geologische geschiedenis van Indonesia, Editor Van Stockum, The Hague.
- Vening-Meinesz, F. A., 1934. Gravity expeditions at sea 1923—1932, vol. II, Waltman, Delft.
- Wegmann, E., 1935. Zur Deutung der Migmatite: *Geol. Rundschau*, vol. 26, pp. 305—350.

Nachwort des Übersetzters.

Der Abdruck des Aufsatzes von van Bemmelen soll keineswegs so verstanden werden, daß einseitig für die darin gegebene Auffassung eingetreten wird. Wohl wird in Kreisen der alpinen Geologen gerne über Unter- und Überschiebungen diskutiert, über die Grundvoraussetzungen, welche eine derartige Stellungnahme eigentlich erfordert, macht man sich jedoch nicht zu viele Gedanken. Gerade dafür, daß diese Grundvoraussetzungen sehr weitverzweigt sind, scheint die Arbeit von Bemmelen ein wertvoller Hinweis zu sein. Daß sie aber nicht nur in dieser Form gesehen zu werden brauchen, geht auch aus dem Vortrag von Prof. J. Hopmann hervor („Probleme der Mondforschung“, *Schriften des Vereines zur Verbreitung naturw. Kenntnisse*, Wien, 1952, S. 71); auch die einfache, aber doch geschlossene Darstellung der Geophysik von Toperczer (besprochen in diesem Heft) sollte bei den Geologen Beachtung finden.

Herwig Holzer, Über die phyllitischen Gesteine des Pinzgaues.

Überblick.

Überschaut man die geologische Literatur über die Nordabdachung der Glocknergruppe und den oberen Pinzgau, so taucht neben einer Reihe anderer Fragen immer wieder das Problem der stratigraphi-