

Beiträge der Petrographie zur Kenntnis der tieferen Teile der Erde

VON W. P. DE ROEVER, Amsterdam

Nach den gegenwärtig bei den Geophysikern herrschenden Auffassungen kann man sich vorstellen, daß die Erde in großen Zügen aufgebaut ist aus verschiedenen Teilen, die gegeneinander ziemlich scharf abgegrenzt sind. Der kugelförmige Kern, innerhalb dessen man noch einen inneren Kern unterscheiden kann, wird durch den sogenannten Mantel umhüllt, und dieser wiederum durch die Erdkruste, auf welcher sich unser Leben größtenteils abspielt. Bei einem Erdradius von etwa 6400 km liegt die Grenze zwischen innerem und äußerem Kern auf etwa 5000 km Tiefe. Innerer und äußerer Kern bestehen wahrscheinlich beide aus Nickeleisen, und zwar im inneren Kern möglicherweise in fester Form, im daran anschließenden äußeren Kern in einem Aggregatzustand, der demjenigen einer Flüssigkeit ähnelt. Die Grenze des Kernes zum Mantel befindet sich auf etwas weniger als 3000 km Tiefe, was etwa dem halben Abstand vom Erdmittelpunkt zur Erdoberfläche entspricht. Der nun folgende Mantel nimmt weitaus den größten Teil des Volumens der Erde ein, da er sich von fast 3000 km Tiefe bis knapp unter die Erdoberfläche erstreckt. Die Obergrenze des Mantels, also die Grenze zwischen Mantel und Erdkruste, befindet sich nämlich unter den Kontinenten größtenteils auf einer Tiefe von nur 30—40 km, während die Tiefe hiervon unter großen Teilen der Ozeanböden sogar weniger als 10 km beträgt. Für die Erdkruste bleibt also fast nichts übrig, höchstens eine dünne Haut von einigen Zehnern Kilometern. Und nicht einmal diese ganze Erdkruste ist uns für direkte geologische und petrographische Beobachtungen zugänglich. Bergwerke und tiefe Bohrungen lassen uns nicht viel tiefer als 5 km beobachten, und das natürlich nur an einzelnen Stellen, während wir von den durch die Ozeane bedeckten Teilen der Erdkruste noch viel weniger wissen.

Die Zusammensetzung der äußersten Teile der Erdkruste auf den Kontinenten ist natürlich gut bekannt: unter einer meist relativ dünnen Decke von wenig veränderten Sedimenten kommen hier verschiedenartige, ziemlich grobkristalline Gesteine vor, deren mittlere Zusammensetzung mit der eines Granodiorites annähernd übereinstimmt; für diesen oberen Teil der kontinentalen Erdkruste und auch für den nicht direkt beobachtbaren mittleren Anteil hiervon wird oft der Terminus „granitisch“ gebraucht. Für die tiefsten Teile der kontinentalen Erdkruste dagegen und auch für die größten Anteile der ozeanischen Kruste wird meistens eine basaltische oder gabbroide Zusammensetzung angenommen.

Es wurde bereits erwähnt, daß sowohl unter den Ozeanen als auch unter den Kontinenten die Erdkruste äußerst dünn ist im Vergleich zu den Dimensionen der ganzen Erde: einige Zehner von Kilometern wiegen wohl gering gegen die mehr als 6000 km des Erdradius und fast 3000 km des Erdmantels. Es ist deshalb begreiflich, daß man bei der Ausschau nach den Ursachen von intensiven Deformationen der Erdkruste, wie z. B. die Bildung von Faltengebirgen — und auch von anderen z. T. damit zusammenhängenden Erscheinungen — sich der Tiefe zuwandte, in den Mantel oder sogar noch tiefer. Eine Zunahme unserer Kenntnis des Erdmantels ist deshalb für die Geologie und Petrologie von primärer Bedeutung und es soll deshalb der Erdmantel das Thema sein, welchem wir uns im folgenden zuwenden. Der Erdmantel war bisher fast ausschließlich die Domäne der Geophysik, eine Wissenschaft, die andere Arbeitsmethoden anwendet als die Geologie und Petrologie; den geophysikalischen Resultaten steht der Geologe und

Petrologe deshalb auch oft einigermaßen fremd und argwöhnisch gegenüber. DE SITTER umschreibt dies treffend, wenn er in seiner „Structural Geology“ über die tieferen Teile der Erde spricht von Gebieten, „which we have never seen, never touched with the hammer“.

Was sind nun die gegenwärtigen Auffassungen der Geophysiker über den Erdmantel, soweit sie in vereinfachter Form wiedergegeben werden können? Zuerst einmal, daß der Mantel im Gegensatz zu den äußeren Teilen des Kernes in einem festen Aggregatzustand sich befindet. Im Mantel können aber über lange Zeitspannen angreifende, große Kräfte dennoch durch plastische Deformationen Bewegungen verursachen, doch diese sind äußerst langsam. VENING MEINESZ z. B. spricht von einer Geschwindigkeit der Größenordnung einiger Zentimeter pro Jahr. Weiterhin meinen die Geophysiker, daß die Dichte des Mantels umgerechnet auf Druck und Temperatur der Erdoberfläche, für die höchsten Hunderte von Kilometern des Mantel wahrscheinlich etwa 3,3 sein wird, dann bis zu einer Tiefe von fast 1000 km schrittweise zunimmt bis 4,0 und schließlich in den tiefsten 2000 km etwa 4,0 konstant bleiben dürfte. Die letztgenannte konstante Dichte weist stark auf eine konstante chemische Zusammensetzung dieser tiefsten 2000 km. An der Erdoberfläche kennen wir jedoch kein Gestein, das ein derart hohes S. G. hat und zugleich weit verbreitet wäre. Wir wenden uns darum vielleicht besser zuerst einmal den untiefen Teilen des Erdmantels zu. Man hat wohl angenommen, daß diese Teile aus einer Art Hochdruck-Äquivalent des Basaltes bestehen, das Eklogit genannt wird. Dagegen sprechen jedoch verschiedene geologische Argumente, unter anderem, daß der Druck direkt unter der dünnen ozeanischen Kruste nicht so hoch ist, als daß man hier Eklogit erwarten könnte. Auch die von DALY lange Zeit verteidigte Hypothese über das Bestehen einer glasartigen Basaltschale in größerer Tiefe konnte sich nicht behaupten gegen die hierauf bezüglichen Laboratoriumexperimente, welche gegen die Auffassung von DALY sprechen. Dagegen ist die Annahme des Aufbaues des Mantels aus Peridotit oder Pyroxenit in guter Übereinstimmung mit den Resultaten der Experimente. Man spricht daher in letzter Zeit immer mehr über Peridotit, oder seinen Hauptbestandteil Olivin, als jenes Gestein oder Mineral, welches den obersten Teil des Erdmantels bildet. Olivin ist ein Magnesiumsilikat von der Formel Mg_2SiO_4 , mit einem bestimmten Fe-Anteil; Peridotit ist ein überwiegend aus Olivin bestehendes Gestein, in dem auch Pyroxene vorkommen, Fe-haltige Mg- und CaMg-Silikate mit den angenäherten Formeln $MgSiO_3$ und $CaMgSi_2O_6$. Auch Minerale der Granatgruppe werden als mögliche Bestandteile genannt. Wir werden später darauf hinweisen, daß petrographische Beobachtungen nicht nur diese Zusammensetzung für die obersten Teile des Erdmantels in großen Zügen bestätigen, jedoch sogar noch viele zusätzlichen Details ergeben. Vorläufig kann man davon ausgehen, daß die höchsten Teile des Mantels hauptsächlich aus Olivin bestehen mit daneben ziemlich viel Pyroxenen. Dies sind also jene Mantelteile, wo die Dichte, umgerechnet auf die Druck- und Temperaturverhältnisse der Erdoberfläche etwa 3,3 betragen dürften, d. h. die obersten Hunderte Kilometer. Wie sieht es nun tiefer im Mantel aus, wo diese umgerechneten Gesteinsdichten schrittweise bis 4,0 zunehmen und dann über 2000 km diesen Wert konstant beibehalten? Eine sehr anziehende Hypothese hierüber, welcher sich verschiedene Geophysiker, unter anderen VENING MEINESZ, mit Enthusiasmus angeschlossen haben, stammt von J. D. BERNAL.

Bei einer 1936 mit JEFFREYS abgehaltenen Diskussion wies er darauf hin, daß man nach Analogie mit dem Magnesium-Germanat auch für Olivin ein Hoch-

druckäquivalent erwarten könnte von kubischer Kristallform und bedeutend höherem S. G. In modernerer Weise ausgearbeitet würde dies bedeuten, daß von einer Tiefe von einigen Hunderten Kilometern bis beinahe tausend Kilometer die Menge an kubischem Hochdruck-Olivin schrittweise zunehmen würde auf Kosten des normalen, rhombisch kristallisierenden Olivins; und daß von etwa 1000—3000 km nur kubischer Hochdruck-Olivin vorkommen dürfte. Untergeordnete Mengen von Pyroxen sind nicht in Betracht gezogen, jedoch könnte man für diese etwas ähnliches annehmen. Es wäre deshalb dieser kubische Hochdruck-Olivin als das verbreitetste Mineral der ganzen Erde anzusehen; sehr wahrscheinlich wurde ein Fe-reiches Analogon hiezu kürzlich von RINGWOOD erzeugt, welcher hierfür bei einer Temperatur von 400° einen Druck von 50.000 Bar oder mehr anwandte; das Produkt RINGWOODS zeigt Spinellstruktur. Das Vorkommen dieses Hochdruck-Olivins würde zur Folge haben, daß die Ergkruste im Lauf ihrer Entwicklung einem Kontraktionsvorgang unterworfen gewesen ist, wofür übrigens kürzlich DE SITTER argumentiert hat. Auch in die geophysikalischen Theorien von VENING MEINESZ paßt die Annahme BERNALS sehr gut, sie ist hierfür selbst eine willkommene Hilfsvorstellung.

Wir wenden uns nun der Behandlung der Frage zu, ob das Gebiet des Erdmantels wirklich die exklusive Domäne der Geophysik sei. Der erste, der dies sehr ausgesprochen mit Nein beantwortete, war THEODOR ERNST aus Göttingen, welcher 1935/36 die Resultate seiner Untersuchungen an verschiedenen Lavaeinschlüssen veröffentlichte.

In den Gesteinen zahlreicher tätiger und erloschener Vulkane finden sich, wie bekannt Einschlüsse, welche zu anderen Gesteinstypen gehören als die des entsprechenden Vulkans und die ziemlich selten vorkommen. Es können dies schon in der Tiefe erstarrte Magmateile sein, jedoch auch möglicherweise Bruchstücke der Wände der Vulkanschlote oder der Wände tiefer gelegener Zuleitungskanäle zu dem Vulkanschlote. Besonders die Brocken der Wände der Zuleitungskanäle sind wertvolle Untersuchungsobjekte, da sie uns eine Einsicht geben in den unerreichbaren tieferen Untergrund der Vulkane. Derartige Einschlüsse können z. B. durch das umgebende Magma veränderte ursprüngliche Sedimente sein, wie z. B. Kalke, Sandsteine und Tone; oder auch kristalline Schiefer, welche dann natürlich im allgemeinen aus größeren Tiefen stammen werden als die nicht auf diese Weise rekristallisierten Einschlüsse von Sedimenten.

Basaltische und verwandte Laven enthalten nun oft Einschlüsse, die zu einem großen Teil aus Olivin mit etwas Pyroxen bestehen; die Pyroxene können jedoch auch fehlen oder eben auch vorwiegen. In vielen Fällen enthalten derartige basaltische Gesteine gleichzeitig relativ große Olivin- und Pyroxenkristalle, welche als frühe Kristallisationsprodukte des Magmas angesehen werden müssen. Vor allem in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wurden Olivinknollen oder -bomben durch zahlreiche Untersucher genau studiert. Es entwickelte sich eine Kontroverse zwischen zwei Gruppen von Petrologen: die Vertreter eines komagmatischen Ursprungs betrachteten die Olivin- und Pyroxenkollen als Aggregate von früh aus dem Magma ausgeschiedenen Kristallen; ihre Gegner jedoch erblickten hierin Brocken der Wände der Zuleitungskanäle, die also nicht demselben Magma entstammten. Verschiedene Autoritäten wie RINNE und ZIRKEL schlossen sich der Gruppe der Komagmatiker an und der Disput schien vorläufig zu Gunsten dieser Gruppe ausgefallen zu sein. Es ist interessant, daß es eines der Argumente der Komagmatiker war, daß man nach dem Standpunkt ihrer Gegner eine unwahrscheinlich große Verbreitung von

olivinreichen Gesteinen im Untergrund annehmen müßte; von einem durch die Geophysiker geforderten, aus Peridotit oder Olivin bestehenden Erdmantel war damals noch keine Rede.

ERNST studierte einige Dezennien später derartige, aus Olivin und Pyroxen bestehende Knollen; er beobachtete, daß die Kristalle hievon eine ziemlich regelmäßige Anordnung, eine Gefügeregelung zeigten, welche zusammen mit anderen Deformationserscheinungen dahin wies, daß die Knollen um ein wesentliches älter sein mußten als das sie umschließende basaltische Gestein. Es waren also doch mitgerissene Brocken der Wände der vulkanischen Zuleitungskanäle. Auch genaue chemische Untersuchungen ergaben Argumente für ein derartiges Entstehen. ERNST betonte, daß die Olivin- und Pyroxenknollen sich durch einen bedeutenden Chromgehalt von den sie umschließenden vulkanischen Gesteinen abhoben und was noch wichtiger ist, daß diese gleiche typische chemische Zusammensetzung an den verschiedensten Fundpunkten der ganzen Welt wiederkehre; er folgerte hieraus, daß diese Knollen als Bruchstücke anzusehen seien des durch die Geophysik postulierten Erdmantels, der ja aus Olivin und Pyroxen bestehen solle.

Die große Bedeutung der Resultate von ERNST ist jedoch im wissenschaftlichen Bereich nur wenig zur Kenntnis genommen worden. FRECHEN veröffentlichte 1948 eine abweichende Auffassung über das Entstehen der Olivinknollen, worauf ich weiter unten noch zurückkommen möchte, und es dauerte bis 1954, bevor die Resultate von ERNST durch detaillierte Untersuchungen von C. ROSS, M. FOSTER und A. MYERS des United States Geological Survey ergänzt und vollauf bestätigt wurden, wobei man nun auch die große Bedeutung dieser Resultate erkannte. Die folgenden sechs Punkte sind nach ROSS und Mitarbeitern von Bedeutung für die Bestimmung der Herkunft der Knollen:

1. Olivinknollen kommen über die ganze Erde verbreitet als Einschlüsse in basaltischen und verwandten Gesteinen vor; überall bestehen sie aus den gleichen vier Mineralien, nämlich Olivin, Enstatit, Cr-haltiger Diopsid und Cr-haltiger Spinell.

2. Die Olivine aller genau untersuchten Einschlüsse zeigen sogar in Details ihrer chemischen Zusammensetzung eine auffallende Übereinkunft; dasselbe gilt für die Enstatite und Cr-haltigen Diopside. Die umschließenden vulkanischen Gesteine dagegen zeigen große Unterschiede in ihrer Zusammensetzung.

3. Es ist unwahrscheinlich, daß annähernd reine Olivinknollen, reine Enstatitknollen und größtenteils aus Cr-haltigem Diopsid bestehende Knollen sich gemeinsam direkt aus dem basaltischen Magma gebildet haben.

4. Die großen Dimensionen von vielen der einzelnen Kristalle, bis mehr als 1 cm und beim Cr-haltigen Diopsid sogar mehr als 10 cm, weisen sicher nicht auf eine direkte Kristallisation aus dem basaltischen Magma. Ich darf ergänzend hinzufügen, daß bei jüngst durchgeführten Laboratoriumsexperimenten unter abnorm hohen Drucken Kristalle von unerwartet hohen Abmessungen synthetisch erhalten wurden.

5. Es ist unwahrscheinlich, daß der hohe Chromgehalt der Spinelle und Pyroxene die Folge ist von Konzentration aus einem basaltischen Magma mit einem Chromgehalt von einigen Hundertstel Prozent.

6. Die Einschlüsse haben eine Struktur, wie sie typisch ist für intensiv deformierte Gesteine, wie z. B. kristalline Schiefer.

ROSS und seine Mitarbeiter betonen weiter die sehr große Übereinstimmung der Knollen mit an der Erdoberfläche vorkommenden Peridotitmassen größerer

Abmessungen. Sie weisen weiter darauf hin, daß viele Olivinknollen aus Gebieten stammen, wo ein Vorkommen von Peridotiten in geringer Tiefe — also in der Erdkruste — unwahrscheinlich ist und folgern, daß die wahrscheinlichste Herkunft der Knollen eben der Erdmantel sein müßte, und folgern weiterhin, daß wenigstens die meisten Knollen vom Mantel direkt in die Höhe geschleppt wurden. Diese Folgerung wird durch HESS und TILLEY gestützt, welcher letztere in diesem Zusammenhang darauf hinweist, daß der Mantel unter großen Teilen der Ozeane auf relativ geringer Tiefe liegt und daß nicht nur auf der St. Pauls Insel, sondern auch als Bodenproben in anderen Teilen des zentralen Atlantischen Ozeans Gesteine gefunden wurden, die mit Olivinknollen vergleichbar sind.

Bevor wir uns nun einer näheren Besprechung der Resultate von ERNST und von ROSS und seinen Mitarbeitern zuwenden, möchte ich noch einige Worte über die Kritik sagen, welche FRECHEN an der Auffassung von ERNST ausübte. FRECHEN hält die zonare Anordnung der ursprünglichen Minerale wie z. B. Enstatit, die er in einigen der vielen von ihm untersuchten Knollen beobachtete, für besonders wichtig. Diese zonare Anordnung soll nach FRECHEN auf ein Entstehen aus einem basaltischen Magma weisen, da diese Strukturen in Peridotiten angeblich nicht vorkommen. Letzteres ist jedoch nicht richtig: Peridotite und verwandte Gesteine zeigen mehrmals Einschlüsse, die eine andere Kristallgröße und andere quantitative mineralogische Zusammensetzung zeigen, wie unter anderen von ROSS und seinen Mitarbeitern beschrieben wurde. FRECHENS Kritik scheint deshalb nicht stichhältig zu sein und es scheint begründet, im weiteren davon auszugehen, daß die Olivinknollen tatsächlich aus dem Mantel stammen.

Was ist nun die große Bedeutung der Untersuchungen von ERNST und von ROSS und seinen Mitarbeitern? Einerseits, daß wir schließen können, daß der Ursprung fast aller vulkanischer Gesteine, die chromreiche Olivinknollen enthalten, im Mantel der Erde gesucht werden muß; und andererseits, daß uns Material des Erdmantels zu direkten petrographischen und anderen Untersuchungen zur Verfügung steht. Hiezu kommt noch der günstige Umstand, daß die Knollen speziell in ihren inneren Teilen oft nur kaum vom umgebenden Magma angegriffen sind: diese dürfen also als repräsentative Proben des Erdmantels betrachtet werden. Dabei sind diese Proben oft nicht einmal so klein: LACROIX berichtet über Olivinknollen mit einem Gewicht von mehr als 100 kg und LAUSEN beobachtete einen Olivinknollen von fast 75 cm Länge. Die Olivinknollen kommen stellenweise in großen Mengen vor, z. B. an der Unterseite von Lavaströmen, wo sie durch Absinken konzentriert sein können. Da die Knollen überall aus den gleichen ursprünglichen Mineralen bestehen, werden diese selben Minerale auch wichtige Bestandteile des obersten Teiles des Erdmantels sein. Es sind dies Olivin, Enstatit, Cr-haltiger Diopsid und Cr-haltiger Spinell. Alle diese vier Minerale sind Glieder von Mischkristallsystemen; in den obersten Teilen des Erdmantels ist die Variation in der Zusammensetzung der drei erstgenannten jedoch merkwürdig gering, wie sich aus den Untersuchungen von ROSS, FOSTER und MYERS ergibt. Die wechselnde Zusammensetzung des Cr-haltigen Spinells ist möglicherweise zurückzuführen auf eine Entstehung aus dem von BERNAL postulierten Hochdruck-Olivin, der gleichfalls Spinellstruktur haben dürfte. Die sich nicht in andere Minerale einfügenden Reste des Hochdruck-Olivins könnten dann, sofern dies möglich wäre, in diesem Spinell konzentriert sein.

Manchmal ist Olivin der Hauptbestandteil der Knollen, manchmal Enstatit oder Cr-haltiger Diopsid; die olivinreichen Knollen bilden jedoch weitaus die

Mehrheit. Die entsprechenden Gesteine in den höchsten Teilen des Erdmantels werden also hauptsächlich Peridotite sein, welche durch eine untergeordnete Menge von Pyroxeniten begleitet werden. Die geophysikalischen Daten über den Erdmantel geben an, daß der oberste Teil des Mantels entweder aus Peridotit oder aus Pyroxenit oder aus beiden Gesteinen zusammen bestehen könnte, aber nur eine geringe Menge basaltischen oder verwandten Materials enthalten könnte. Da wir soeben sahen, daß in der Gruppe der Peridotite und Pyroxenite die erstgenannten stark überwiegen, werden wohl die Peridotite die verbreitetsten Gesteine der äußeren Hunderte km der Erde sein; das Gesamtvolumen der Erdkruste, die größtenteils aus anderen Gesteinen besteht, bildet hievon nämlich nur einen Bruchteil.

Nicht nur die Größe der Kristalle, jedoch auch die quantitative mineralogische Zusammensetzung der Peridotite und Pyroxenite in den höchsten Mantelteilen wird auf Grund vieler Beobachtungen an den Knollen von Ort zu Ort verschieden sein. Die z. B. durch BLEIBTREU an einigen Knollen beobachtete Abwechslung paralleler Lagen von verschiedener Zusammensetzung weist darauf hin, daß auch im Mantel eine ähnliche Abwechslung von parallelen Lagen von verschiedener Zusammensetzung auftritt; an der Erdoberfläche vorkommende große Peridotitmassen zeigen übrigens ein ähnliches Bild.

Es wird in der Zukunft möglich sein, an Hand der mittleren Zusammensetzung der Knollen angenäherte Zahlen für die mittlere Zusammensetzung der gesamten Mantel-Peridotite und -Pyroxenite zu erstellen. Nach statistischen Untersuchungen von FRECHEN an 350 Knollen eines Fundpunktes in der Eifel ist der Olivinegehalt im Mittel ungefähr zehnmal so groß wie der Enstatitgehalt; über die übrigen Bestandteile liegen viel weniger quantitative Daten vor. Wenn man auf Grund der Daten von FRECHEN und ERNST eine sehr rohe Schätzung machen sollte von der mittleren Zusammensetzung der gesamten Peridotit- und Pyroxenitgesteine in den äußeren Teilen des Erdmantels, so würde dies folgendes Bild ergeben: Olivin zwischen 60—90%, Enstatit und Cr-haltiger Diopsid jeder zwischen 5—20%, Cr-haltiger Spinell nur ein oder wenige Prozente; sekundäre Bestandteile sind hiebei nicht in Betracht gezogen.

Die Orientierung der Olivinkristalle im Raum ist nicht willkürlich: die Achsen der Kristalle sind meist in der Nähe von bestimmten Richtungen oder Flächen orientiert; die Gesteine zeigen somit eine Gefügeregelung. Die Olivinkristalle sind nach ERNST auch in einer bestimmten Richtung abgeplattet, während andere Untersucher auf verbogene Enstatitkristalle und deformierte Olivinkristalle hinweisen. Die gerichtete Struktur der Knollen und folglich auch die der Mantelperidotite muß man deshalb nicht als Fließstruktur im Magma betrachten, jedoch sind diese Gesteine mit den kristallinen Schieferen der Erdkruste zu vergleichen und müssen einer sehr intensiven Deformation verbunden mit Internbewegungen ausgesetzt gewesen sein. Es ist naheliegend, in diesem Zusammenhang zu fragen, ob diese Bewegungserscheinungen möglicherweise zusammenhängen könnten mit den von VENING MEINESZ und anderen geforderten, episodisch auftretenden, sehr langsamen Mantelströmungen. Nebenbei sei hier vermerkt, daß ähnliche Bewegungserscheinungen auch an großen, an der Erdoberfläche vorkommenden Peridotitmassen beobachtet wurden. In diesem Zusammenhang ist eine Bemerkung von BIRCH wichtig; er führte Messungen aus an verschiedenen Gesteinstypen zur Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen und beobachtete, daß die größten Unterschiede zwischen Messungen in drei senkrecht zueinander stehenden Richtungen bei olivinreichen Peridotiten (Duniten) und bei

bestimmten kristallinen Schiefen auftreten. Es ist dem Verfasser nicht bekannt, ob die Dunitproben, worauf BIRCH Bezug nimmt, aus Olivinknollen oder anderen Dunitmassen stammen; dies macht jedoch wenig aus, denn beide zeigen, soweit wir wissen, ein gerichtetes Gefüge oder, anders gesagt, eine deutliche Anisotropie. In den Peridotiten der höchsten Teile des Erdmantels sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Erdbebenwellen deshalb offenbar abhängig von der Richtung des Gefüges dieser Gesteine. Wenn nun dieses gerichtete Gefüge durch Strömungen im Erdmantel hervorgerufen sein sollte, ist es nicht ganz ausgeschlossen, daß man in der Zukunft diese Unterschiede in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit dazu verwenden könne, um abzuleiten, wie diese Strömungen verlaufen.

Doch nun genug über diese Gesteine: die äußeren Teile des Mantels bestehen ja nicht allein aus Peridotiten und Pyroxeniten, sondern enthalten dann und wann auch die Magmen, welche die Olivin- und Pyroxenknollen in die Höhe gebracht haben. Diese Magmen, im vorigen kurz als Basalte und deren Verwandte angedeutet, werden also sicher für eine gewisse Zeit ein Bestandteil der obersten Mantelteile gewesen sein. Olivinknollen wurden u. a. gefunden in Olivinbasalten, Limburgiten, Melilithbasalten, Nephelinbasalten, Nephelinbasaniten und auch in einem einzelnen Phonolith. Magmen, welche diese Gesteine liefern, müssen also zumindest manchmal in den obersten Mantelteilen vorkommen. Die Lokalisierung solcher Magmenherde könnte vielleicht auf Grund ihrer abschirmenden Einwirkung auf transversale Erdbebenwellen durchgeführt werden; diese transversalen Wellen können sich nämlich nicht durch eine derartige flüssige Masse fortpflanzen. Nach einer vorläufigen Publikation hat der Russe GORSHKOV auf diese Weise ein Magmenreservoir lokalisiert.

Es ist naheliegend, anzunehmen, daß die in den höchsten Mantelteilen vorkommenden Magmen da auch manchmal zur vollständigen Auskristallisierung kommen. Dies gilt vor allem für die Mantelteile, die sich unter den Ozeanen befinden; dort sind die Temperaturen an der Oberseite des Mantels nämlich niedriger. In der Tiefe kristallisierte oder plutonische Äquivalente der eher genannten vulkanischen Gesteine werden also auch in geringen Mengen in den oberen Mantelteilen vorkommen, in geringen Mengen deshalb, weil gegen größere Mengen die geophysikalischen Daten sprechen.

Wo kommen nun diese Magmen her? Zum Teil können sie durch magmatische Differentiation aus anderen Magmen entstanden sein und man kommt so schließlich zu einem Muttermagma und wahrscheinlich auch noch zu einer Menge von leichtflüchtigen Bestandteilen, welche dann nicht direkt an das Muttermagma gebunden sein müssen. Nach den Auffassungen vieler Untersucher wird man für dieses Muttermagma eine olivinbasaltische Zusammensetzung annehmen müssen. Und hieraus ergibt sich wieder die Frage, woher sich dieses olivinbasaltische Muttermagma ableitet? Mit welchem Schritt wir jedoch in das Grenzgebiet der Petrologie zu der Phantasie gelangen. BOWEN hat die Meinung vertreten, daß dieses olivinbasaltische Muttermagma durch teilweise Aufschmelzung feldspathaltiger Peridotite des Mantels entstanden sein könnte. Oder sollte es wenigstens teilweise ein Urmagma sein, daß sich bisher noch nie in einem festen Aggregatzustand befunden hat? Die größeren magmatischen Massen, die gelegentlich aus dem Mantel ausgestoßen werden, dürften nach meiner Auffassung in beiden Fällen entstanden sein durch das Zusammenströmen zahlloser winziger Magmeneinheiten, die sich in den Hohlräumen zwischen den

Kristallen der eigentlichen Peridotitminerale befanden. Wie kann jedoch das Zusammenströmen dieser winzigen isolierten Magmeneinheiten zustande kommen? Die Antwort hierauf kann man wahrscheinlich ablesen aus der Struktur der Peridotite im höchsten Teil des Mantels. Diese Peridotite haben nämlich eine sehr intensive Deformation mitgemacht. Bei einer derartigen Deformation sind die kleinen Magmaeinheiten viel beweglicher als die Kristalle der Peridotitminerale; die Magmaeinheiten bewegen sich deshalb viel leichter nach Bereichen, wo der Druck geringer ist. Die Deformation ist so stark, daß es für ausgeschlossen gehalten werden muß, daß unter den gegebenen Umständen ein derartiger Vorgang nicht stattgefunden hätte. Es ist also die intensive Deformation, in deren Folge die kleinen isolierten Magmeneinheiten zu größeren Magmenmassen zusammenströmten. Hieraus könnte sich erklären, warum wir in den intensiv deformierten Peridotiten der obersten Mantelteile praktisch keine Feldspäte mehr antreffen: diese Peridotite dürften demnach ihren basaltischen Anteil bereits längst verloren haben. Wenn, wie bereits angedeutet, die Deformation der Mantelperidotite mit Strömungen im Mantel zusammenhängt, dann würde die Absonderung größerer Massen basaltischen Magmas auch eine Folge dieser Strömungen sein. Oberdies dürften die größten dieser Strömungen nach den gebräuchlichsten Vorstellungen die Bildung von Faltengebirgen zur Folge haben. Man könnte also auf diese Art einen Zusammenhang vermuten zwischen der Bildung von Faltengebirgen und der Absonderung großer Massen basaltischen Magmas. Das Ausströmen großer Mengen basaltischer und verwandter Magmen während des geosynklinalen Stadiums der Bildung von Faltengebirgen dürfte auf diese Art zu erklären sein.

Wenn wir die Hauptzüge dieses Gedankenganges zusammenfassen, kommen wir zum folgenden vereinfachten, wir können sogar sagen all zu sehr vereinfachten Bild: gewisse Teile des Mantels enthalten zu einem gegebenen Zeitpunkt zahllose sehr kleine und isolierte basaltische Magmenteile, welche entweder bisher noch nie fest waren oder durch teilweise Aufschmelzung von feldspatführenden Peridotiten entstanden sind. Hiezu kommt, daß als Folge der Abkühlung der Erde eine Strömung im Mantel entstehen kann, die aber auch nach einiger Zeit wieder aufhört. Da der Mantel so gut wie ganz einen festen Aggregatzustand hat, wird diese Strömung als plastische Deformation des Mantelmaterials vor sich gehen und deshalb sehr langsam sein. Durch diese plastische Deformation werden die kleinen isolierten Magmateile zu größeren Magmenmassen konzentriert. Es ergibt sich so eine Trennung von festem Peridotit ohne basaltischen Anteil einerseits und größeren Massen basaltischen Magmas andererseits. Diese großen Magmenmassen werden durch die Strömungen im Mantel weiter ausgedrückt und im vertikalen und horizontalen Sinn verlagert, um schließlich größtenteils aus dem Mantel ausgestoßen zu werden.

Bei diesem Gedankengang haben wir noch keine Rücksicht genommen auf den hypothetischen Hochdruck-Olivin mit kubischer Kristallform, welcher in den tieferen Teilen des Mantels vorkommen dürfte. Sollte es sein, daß dieser Hochdruck-Olivin und eventuell auch andere Hochdruck-Minerale bei ihrer Bildung fein verteiltes basaltisches Material in ihr Kristallgitter aufnehmen? Und könnte es sein, daß dieses wiederum frei wird bei der Umwandlung in die entsprechenden Niederdruck-Minerale, wie man sich dies vorstellen könnte, wenn die Übergangszone zwischen den tieferen und höheren Teilen des Mantels durch den aufsteigenden Ast eines Konvektionsstromes durchbrochen wird? Man sieht, daß die konsequente Verfolgung dieser Gedankengänge von der

Petrologie zu einer Art Petrophantasie führt. Dies verändert jedoch nichts an dem Wert jener Folgerungen, von welchen wir ursprünglich ausgegangen sind.

Zum Schluß möchte ich noch darauf hinweisen, daß ich vor einiger Zeit die Möglichkeit vertreten habe, daß viele der großen Peridotitkörper, welche man jetzt an der Erdoberfläche findet, nichts anderes als aus ihrem Verband gerückte Bruchstücke des Erdmantels sein könnten, in großem Maßstab eine Art Äquivalent von TALIAFERROS „cold intrusions“. Wenn sich dies bestätigen sollte, wären die petrographischen Eigenschaften der obersten Teile des Erdmantels noch leichter zu studieren, was sich jedoch erst in der Zukunft ergeben wird. Es sieht danach aus, als ob von Seiten des Massachusetts Institute of Technology ein Beitrag zur Lösung dieses Problems zu erwarten sei mit Hilfe der Sr-Rb-Methode für Altersbestimmungen. Auch anderartige Laboratoriumuntersuchungen sind auf alle Fälle nötig. Die nach meiner Auffassung anfechtbaren Thesen von DUBERTRET und BRUNN über die Entstehung der Peridotite könnte man mit den gleichen Methoden überprüfen, wie sie von ERNST und von ROSS und Mitarbeitern auf die Olivinknollen angewendet wurden. Auch viel geologische und petrographische Feldarbeit wird unentbehrlich sein. In dieser Hinsicht kann darauf hingewiesen werden, daß während von dem Verfasser geleiteter Feldarbeiten in Nordwestspanien tektonisch tief gelegene Peridotitkörper entlang Zonen intensivster Bewegung angetroffen wurden.

Auch wenn diese und andere große Peridotitkörper sich in Zukunft nicht als Fragmente des Erdmantels erweisen sollten, glaube ich trotzdem voraussagen zu können, daß die Petrographie in der nächsten Zukunft in zunehmendem Maße durch direkte Beobachtungen Daten über den Erdmantel liefern wird.

Literatur

- BERNAL: The Observatory, a monthly review of Astronomy (London), 59, S. 268 (1936).
BIRCH: Contributions in Geophysics in honor of Beno Gutenberg, S. 159 (1958).
BLEIBTREU: Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges. 35 (1883).
BOWEN: The evolution of the igneous rocks (1928).
BRUNN: Ann. Géol. des Pays Helléniques, I, 7 (1956).
DUBERTRET: Mus. National d'Hist. Naturelle, Paris, Notes et Mém. sur le Moyen-Orient 6 (1955).
ERNST: Nachr. Gesellsch. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl., N. F., IV, 1 (1935).
ERNST: Chemie der Erde 10 (1936).
FRECHEN: Neues Jahrb. f. Min. usw., Abh. 79 A (1948).
GORSHKOV: Bull. volcanologique, II, 19 (1958).
HESS: Proc. Roy. Soc. London, A 222 (1954).
LACROIX: Les enclaves des roches volcaniques (1893).
LAUSEN: Amer. Journ. Sci., V, 14 (1927).
Mass. Inst. of Techn.: HURLEY et al.: Variations in isotopic abundances of Strontium, Calcium and Argon and related topics, S. 129—130. Fifth annual progress report for 1957—1958, U. S. Atomic Energy Commission, NYO-3938.
RINGWOOD: Bull. Geol. Soc. Amer. 69 (1958).
RINNE: Jahrb. Königl. Preuß. Geol. Landesanst. 13 (1892).
DE ROEVER: Geol. Rundschau 46 (1957).
ROSS, FOSTER und MYERS: Amer. Mineralogist 39 (1954).
DE SITTER: Structural Geology (1956).
TALIAFERRO: Bull. Amer. Ass. Petroleum Geol. 27 (1943).
TILLEY: Proc. Geol. Soc. London 1521, S. 49 (1955).
VENING MEINESZ: De Ingenieur 68 (1956).
VENING MEINESZ: Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. B 60, S. 409 (1957).
ZIRKEL: Abh. math.-phys. Kl. Königl. Sächs. Ges. Wiss. 28 (1903).