

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1967

MÜNCHEN 1968

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

DIE ERFORSCHUNG DES OBEREN ERDMANTELS

FESTREDE

*gehalten in der öffentlichen Sitzung
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in München am 2. Dezember 1967*

von

THEODOR ERNST

o. Mitglied der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse

Dieser Schalenbau der Erde ist etwa seit der Jahrhundertwende durch intensive geophysikalische Forschungsarbeit genauer erkannt worden, trotzdem ist der Aufbau selbst dieser oberen Schichten – 50–100 km von uns entfernt – in den Einzelheiten weitgehend noch unbekannt. Fast alle Kulturnationen haben daher Kommissionen der Geowissenschaftler – Geophysiker, Geodäten, Geologen und Mineralogen – gebildet, um dieses „Upper Mantle Project“ im engen Kontakt miteinander zu bearbeiten, über die Grenzen und Ideologien hinweg. Die Aufklärung über den inneren Aufbau erfolgte und erfolgt im wesentlichen durch die Methoden der Geophysik; die Mineralogen waren bisher kaum beteiligt. Erst seit kurzer Zeit kann die mineralogische Forschung zur Lösung eines Teilproblems wesentliche Beiträge liefern, im besonderen über die Gesteinszusammensetzung dieser uns verborgenen Schichten. Als Mineraloge werde ich darüber hauptsächlich berichten. Meine Kollegen der Nachbarwissenschaften werden Verständnis dafür haben, daß ich in diesem Referat auch in ihr Gebiet einbreche – bei mir mit dem Unbehagen, das jeden Wissenschaftler befällt, wenn er sich von seinem eigentlichen Fachgebiet entfernt.

Über den grundsätzlichen Aufbau der Erde mit ihrer Schalenstruktur erhält man durch die Verteilung der Schwerebeschleunigung und damit über die Dichte des Materials der Tiefenschichten entsprechende Hinweise, doch geben uns vor allem die Erdbebenwellen großer Beben Aufschluß über die konzentrisch-schaligen Grenzflächen der Erde.

Die Erdbeben, die solche katastrophalen Auswirkungen haben, gehören zu den *tektonischen* Beben, bei denen es sich um unterschiedliche Bewegungen von Teilen der Erde, um Bewegungen riesiger Gesteinsmassen relativ zueinander handelt. Sogenannte vulkanische Erdbeben, die vor oder während eines vulkanischen Ausbruches stattfinden, sind sehr lokal begrenzt und für unsere Betrachtung im allgemeinen nicht von Bedeutung. Die Erörterung nach den Ursachen der Bewegung solcher riesiger Gesteinsmassen soll vorerst nicht erfolgen. Die liegen, wie dies ein Forscher ausdrückt „in der Nähe reiner Spekulation“, doch kann man den Vorgang selbst betrachten. Verschiebungen von Teilen der Erde

gegeneinander können zu Verbiegungen und Verspannungen führen, wenn das Material selbst fest ist. Solch ein verspanntes Material gleicht dann einer gespannten Feder oder einem gespannten Bogen vor dem Abschießen des Pfeiles. Wird durch solch eine Spannung die Festigkeit des Gesteins oder Materials überschritten, stellt sich durch die plötzliche Verschiebung der Gesteinspakete ein entspannter Zustand ein. Bei diesem Vorgang pflanzen sich die dabei entstehenden Erschütterungen in der Erde mit großer Geschwindigkeit von einigen Kilometern pro Sekunde nach allen Richtungen fort. Je nach Größe der Gesteinsmassen und der Festigkeit des Materials kann es verhältnismäßig bald zu einem Nachgeben und zu einem Abbau der Spannungen kommen; die große Zahl der Beben ist hierfür ein Hinweis. Man schätzt im Mittel die Zahl aller Beben pro Jahr auf etwa eine Million, etwa 50000 können davon ohne Instrumente wahrgenommen werden und rund 20 gehören zu den Großbeben, die auf der ganzen Welt registriert werden können; 1–2 pro Jahr – eine Mittelung über viele Jahre – sind von katastrophalem Ausmaß. Besonders die großen Beben, die auf der ganzen Erde registriert werden, sind für die vorliegende Aufgabe von besonderem Interesse.

Die Erdbebenwellen gehen von einem Erdbebenherd, dem Hypozentrum im Inneren der Erde aus. Der diskontinuierliche Aufbau der Erde in Schalen ergibt sich aus den verschiedenen Fortpflanzungs-Geschwindigkeiten und den Fortpflanzungs-Richtungen der Erdbebenwellen.

Wie ist es möglich, daß bei einem Beben angegeben wird, daß sich der Herd in einer bestimmten Tiefe z. B. 20 km unterhalb der Erdoberfläche befindet und was berechtigt eine Erdbebenstation zu der Angabe, daß für ein registriertes Beben der Herd sich in einer Entfernung – um wieder ein willkürliches Beispiel zu geben – von 6000 km befindet?

Es handelt sich bei den Erdbebenwellen um elastische Schwingungen, und zwar sowohl um Verdichtungs- oder Longitudinalwellen, bei denen die Teilchen eines Gesteins hin- und her-Bewegungen in der Fortpflanzungsrichtung ausführen, so wie beim Schall – nur mit viel größerer Geschwindigkeit –, andererseits um Transversalwellen, d. h. um Schwingungen quer zur Fortpflanzungs-Richtung mit auf- und ab-Bewegungen der Teilchen wie

bei den Wasserwellen. Auf die weitere Unterteilung der Erdbebenwellen braucht hier für unsere Frage nicht eingegangen zu werden.

Auf den Seismogrammen* erscheinen die verschiedenen Wellenarten wegen der verschiedenen Geschwindigkeiten bei großer

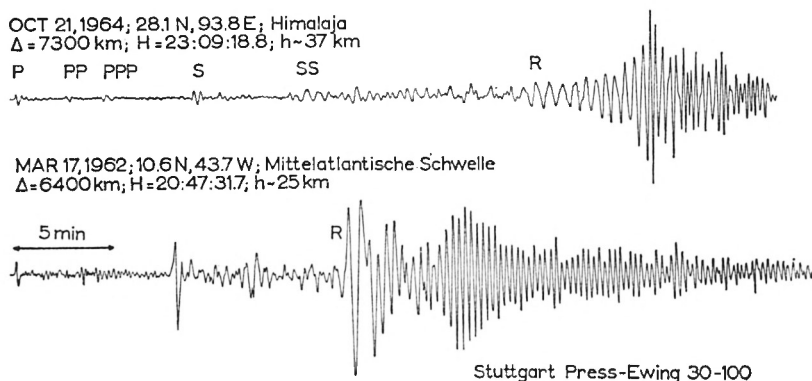


Abb. 2. 2 Seismogramme, deren vergleichbare Einsätze die unterschiedliche Herdentfernung der beiden registrierten Erdbeben zeigen.

Herdentfernung als getrennte Einsätze: Je weiter der Herd entfernt ist, um so größer ist die Zeitdifferenz zwischen der Ankunft der verschiedenen Wellenarten. Trotz sehr vieler Faktoren, die die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen beeinflussen, ist es durch viele mühevollen Arbeit gelungen, aus den Seismogrammen, die die Erschütterungen aufgezeichnet liefern, nicht nur die Herdentfernung, sondern auch den Schalenbau der Erde und viele weitere Einzelheiten über ihre Struktur zu bestimmen. Man bekommt einen Begriff über die auftretenden Schwierigkeiten allein aus der Anzahl dieser beeinflussenden Faktoren: dem Druck in den verschiedenen Erdtiefen, der Dichte und der Temperatur des

* Mit freundlicher Genehmigung des Verfassers, Herrn Prof. Dr. W. Hiller, aus dem Kapitel 35 „Geophysik“ des Lehrbuches der Allgemeinen Geologie, herausgegeben von R. Brinkmann, Band III, Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart 1967.

dort vorhandenen Materials, dem Widerstand des Materials gegen Zusammenpressung, dem Widerstand gegen eine Formänderung des Materials: alle diese Faktoren sind nicht konstant, sondern ändern sich längs des Weges, den die Erdbebenwellen nehmen. Hinzu kommen Beugungs- und Reflexionserscheinungen, ähnlich wie sie bei der Fortpflanzung des Lichtes in verschiedenen Medien beobachtet werden, die bewirken, daß die Fortpflanzung der Erschütterungen *nicht* geradlinig in der Erde erfolgt.

Der Schalenbau ergibt sich aus den Geschwindigkeiten der Erdbebenwellen und ihrer mehr oder minder ausgeprägten sprunghaften Erhöhung beim Überschreiten der jeweiligen Grenzen, so etwa für die Verdichtungswellen, die sich oberhalb der sogenannten Mohorovičić-Diskontinuität, die die Grenze zwischen Erdkruste und Erdmantel angibt, mit etwa 6–7 km/sec im Mittel fortpflanzen, während in größeren Tiefen unterhalb dieser Schichtgrenze eine Geschwindigkeit von 8 km/sec und mehr gemessen wird! Ähnliche Unterschiede findet man auch für die langsameren Transversalwellen.

Für die Festlegung der Grenze zwischen der Erdkruste und dem oberen Mantel, der bereits erwähnten Mohorovičić-Diskontinuität, hat man mit Erfolg die Erschütterungen durch künstliche Sprengungen ausgewertet. Diese Schichtgrenze liegt in den Kontinenten etwa in Tiefen von 30–50 km, doch ist sie nicht genau kugelschalig. Auffallend ist die Verdünnung der Erdkruste unter den Ozeanen. Die Grenze Erdkruste–Erdmantel liegt hier nicht so tief als unter den Kontinenten, nur etwa 10 km unter dem Ozeanboden. Ferner treten Abweichungen auch unter den Faltengebirgen und deren Umgebung auf z. B. unter den Alpen. Sie sind für die weiteren Folgerungen von größter Bedeutung; auf sie soll noch eingegangen werden.

Das hier gegebene Bild über die Ergebnisse der geophysikalischen Forschung entspricht nicht dem modernen Stand. Es ist im einzelnen viel detaillierter; für seine Aufstellung wurden neben den seismischen Verfahren auch andere physikalische Erscheinungen ausgewertet. Dies Bild möge aber für die folgenden, mehr stofflichen Probleme ausreichend sein.

Man hat sich natürlich die Frage vorgelegt, welches die Ursachen der verschiedenen Geschwindigkeiten der Erdbebenwellen

sind. Sind es nur Unterschiede im Zustand des Materials, etwa festflüssig, also kristallin-amorph oder liegt ein Materialwechsel vor?

Die Ansichten über die Ursache der Änderung der Geschwindigkeit der Erdbebenwellen an der Grenze Erdkruste-Erdmantel sind nicht einheitlich; teils wird die Änderung auf einen Materialwechsel mit verschiedener chemischer Zusammensetzung zurückgeführt, andererseits nimmt man an, daß hier Dichteänderungen des gleichen chemischen Materials, aber mit verschiedenem Materialbestand und verschiedenen elastischen Eigenschaften vorliegen, etwa durch den Übergang von Basalt in Eklogit. Ob der Eklogit allerdings beim weiteren Vordringen in die Tiefe das vorherrschende Material ist, erscheint zweifelhaft. Wahrscheinlich geht die Zusammensetzung in Gesteine über, die im wesentlichen aus Magnesiumsilikaten bestehen.

Zwar war man sich in den gesamten Geowissenschaften lange darüber einig, daß mit zunehmender Tiefe sich die Gesteinszusammensetzung wesentlich ändern müßte in der Art, daß spezifisch schwerere Gesteine die leichteren der Erdkruste unterlagern müßten. Solche relativ schweren Gesteine sind dem Petrographen und Geologen auch auf der Erdoberfläche bekannt; sie treten allerdings nur verhältnismäßig selten auf und ihre Hauptelemente – Magnesium und Eisen – sind am Aufbau der Erdkruste im Mittel nur untergeordnet beteiligt.

Diese Gesteine mit diesen magnesium-reichen Mineralen hat man früher allgemein mit der Abkürzung Sima (= SiMg) bezeichnet, im Gegensatz zum Sial: Abkürzung für Silizium-Aluminium-Verbindungen, die an der Erdkruste vorherrschen und besonders Alkali- und Erdalkali-Aluminium-Silikate bilden, vornehmlich die Feldspäte als eine sehr wesentliche Mineralart der Erdkruste. Genauer bezeichnet man die ultrabasischen, d. h. äußerst kieselsäurearmen Gesteine als Peridotite, die aus verschiedenen Magnesium-Silikat-Mineralen zusammengesetzt sind, vor allem aus Olivin – auch Peridotit genannt – und aus Pyroxen, einer Mineralgruppe, zu denen der Augit gehört. Da diese beiden charakteristischen Mg-Mineralen uns noch mehrfach beschäftigen werden, sei hier noch erwähnt, daß sie sich durch ein verschiedenes Verhältnis Magnesiumoxyd zu Kieselsäure derart unter-

scheiden, daß die Pyroxene formelmäßig doppelt so viel Kieselsäure enthalten als der Olivin.

Weitere Quellen von sehr tiefliegendem Material stellen aber auch manche Schmelzen dar, die durch vulkanische Eruptionen an die Erdoberfläche gefördert sind und dort zu Basalten erstarrten. Bei den Ergüssen der Hawaiischen Inseln und in Japan hat man aus den begleitenden Erdbeben vor und während der Eruptionen Hinweise bekommen, daß die Entstehung der primären basaltischen Schmelze in Tiefen von mehr als 50 km vor sich gegangen ist, also aus einem Niveau des *Erdmantels* stammt. Wie die Aufschmelzung oder das Flüssigwerden im einzelnen verläuft, ist zwar noch unbekannt, doch dürfte die Annahme einer zusammenhängenden flüssigen amorphen erdumspannenden Schicht, vergleichbar mit dem Fließen an der Erdoberfläche, nicht stimmen. Es liegt hier ein Gebiet vor, das jetzt dem Experiment zugänglich ist.

Hier können die Höchstdruckuntersuchungen weiter helfen in der Weise, daß man unter den im Erdmantel herrschenden Drucken und Temperaturen die Kristallisation von Schmelzen mit basaltischer Zusammensetzung untersucht und die Kristallisationsprodukte mit den natürlich vorkommenden Mineralassoziationen der verschiedenen Basalte vergleicht. Außerdem können natürlich auch Systeme mit anderer chemischer Zusammensetzung betrachtet werden.

Durch die erste gesicherte Diamantsynthese 1954 der amerikanischen Firma General Electric sind solche Höchstdruckversuche allgemein bekannt geworden mit Drucken zwischen 53–90000 Atmosphären und Temperaturen von 1200–3500° C. Sie werden heute in vielen Laboratorien der Welt durchgeführt, auch in Deutschland. Auf dem mineralogischen Gebiet ist hier Prof. Neuhaus in Bonn Schrittmacher gewesen, besonders für grundsätzliche Fragen der Höchddruck-Chemie. Da man die überlagernden Schichten mit den Dichten ihrer Gesteine annähernd kennt, ist es möglich, solche Tiefen in Druck umzurechnen, z. B. 100 km Erdtiefe in etwa 30000 Atmosphären, etwa 30 kb. Die Angaben der in diesen Tiefen herrschenden Temperaturen sind dagegen viel unsicherer und variieren bei den verschiedenen Forschern beträchtlich. Zwar ist die geothermische Tiefenstufe all-

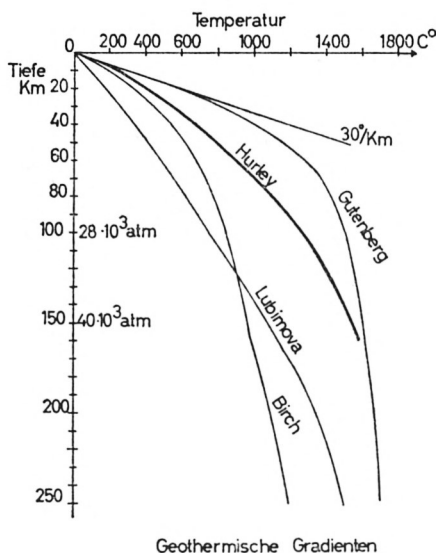


Abb. 3. Das Kurvenbild über die Temperatur des Erdinnern zeigt – trotz der Unsicherheit der Temperaturangaben verschiedener Forscher –, daß sie sehr viel langsamer ansteigt, als man es nach der geothermischen Tiefenstufe erwartet.

gemein bekannt. Mit dem Vordringen in größere Tiefen steigt die Temperatur zunächst um 1° an bei einem Vordringen um 30 m, aber dieser Wert ist vorwiegend in den Sedimentschichten ermittelt und gilt sicher nicht für größere Tiefen und auch nicht für ganz anders zusammengesetzte Gesteine. Ein Kurvenbild über die verschiedenen Angaben möge die Unsicherheit demonstrieren. – Trotzdem kann man unter Berücksichtigung der Experimentalergebnisse etwas sehr Wesentliches aus diesem Kurvenverlauf zeigen. Es interessiert zunächst, wie sich die Materie in größeren Erdtiefen verhält, ob eine Aufschmelzung überhaupt vorkommen kann, welche Viskositäten d. h. Beweglichkeiten vorliegen und was man über das Fließvermögen der Materie bei diesen Bedingungen aussagen kann. Als Ergebnis der Untersuchungen, die besonders von amerikanischen, englischen und australischen Gelehrten ausgeführt wurden, darf zunächst angesehen werden, daß in den Tiefen des oberen Erdmantels – bis mindestens 300 km Tiefe herunter, wahrscheinlich aber viel tiefer – im allgemeinen

das Material kristallin vorliegt im Gegensatz zu den Vorstellungen über eine flüssige amorphe Unterschicht unter der Erdkruste. Von dieser Aussage wird die Deformierbarkeit und das Fließverhalten – besser das rheologische Verhalten – nicht betroffen. Auch im Falle einer Aufschmelzung würde sich eine Schmelze bei den hohen Drucken kurzzeitigen Stößen gegenüber wie ein starrer Körper verhalten, umgekehrt kann ein kristallines Material einem Druck nachgeben und fließen, vergleichbar einem Verformungsprozeß bei dem Walzen von rotglühendem Eisen. Die Geschwindigkeit, in der die Materie im Innern der Erde sich fortbewegt, dürfte etwa in der Größenordnung von wenigen cm im Jahr liegen. Schon diese Verformungsgeschwindigkeiten reichen für die beobachteten geophysikalischen Prozesse aus.

Der kristalline Aufbau der Gesteine im Innern der Erde, etwa in 50 bis 100 km Tiefe, bedeutet bei dem Vorhandensein verschiedener Kristallarten mit verschiedenen Schmelzpunkten – falls das Schmelzen aus irgendeinem Grunde zustande kommt – daß zuerst nur eine Teilschmelze der am niedrigsten aufschmelzenden Minerale auftritt. Solche Annahmen hat man für die tieferen Schichten bereits früher schon als Hypothese ausgesprochen in Analogie zu dem Verhalten der Materie bei Atmosphärendruck. Die Schmelzen, die als basaltisches Magma aus den Vulkanen hervordringen, können daher von der im Innern der Erde vorhandenen Gesteinsart vielleicht nur *Teilschmelzen* sein, die sich vom Restmaterial getrennt haben und die sich stofflich von diesem wesentlich unterscheiden können. Es besteht aber auch die Möglichkeit, daß alle in dem Ursprungsgestein der Tiefe vorkommenden Minerale sehr ähnliche Schmelzpunkte haben und daß das Gestein daher in einem engen Temperaturintervall praktisch einheitlich aufschmilzt und als primär gebildetes Magma gefördert wird, so daß man im Basalt selbst das Material der Tiefe hätte, das allerdings im Oberen Mantel auch in einer sehr dichten Hochdruckform, dem Eklogit, vorliegen könnte. Hier stehen sich also zwei Auffassungen über die verschiedene Zusammensetzung des kristallinen Ausgangsmaterials gegenüber.

Es ist für die Beurteilung der auftretenden verschiedenen Basaltarten zu berücksichtigen, daß beim Aufstieg solcher primär gebildeten Magmen durch Spalten und Schlote durch Aufnahme

und Auflösung von Nachbargestein Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung eintreten können. Man wird daher zur Lösung des Problems möglichst große Basaltvorkommen als Proben der Tiefe ansehen – sie sollten nach dieser Hypothese in einem Schub hochgedrungen sein und daher gleiche oder sehr ähnliche Zusammensetzung besitzen. Die riesigen Überflutungen durch basaltische Magmen, wie sie in verschiedenen Teilen der Welt vorliegen und die als Decken-Basalte oder Plateau-Basalte bezeichnet werden, könnten am wahrscheinlichsten hierher gehören. Sie zeigen auch bei wiederholter Förderung über längere Zeiträume eine sehr ähnliche Zusammensetzung, und diese Zusammensetzung findet sich in den verschiedenen Gebieten der Erde wieder. Über die Menge des geförderten Materials bekommt man eine Vorstellung z. B. durch die Deccan-Basalte Vorderindiens. Heute noch sind es etwa 500000 km², in früheren Zeiten unter Berücksichtigung der Abtragung durch Verwitterung wird die Fläche der Überflutung auf mindestens das Doppelte geschätzt, das vierfache der Größe der Bundesrepublik Deutschland. Die Dicke der Basaltschicht, die bis 2000 m ansteigt, wird im Mittel zu 600 m angegeben. Das Volumen der Basaltmasse, die im Deccangebiet gefördert wurde, muß demnach mindestens 300000 km³, wahrscheinlich aber 1000000 km³ betragen. Das würde einer Kugel von mindestens 80 km Durchmesser, wahrscheinlich aber von 120 km Durchmesser entsprechen.

Diese enorme Masse ist natürlich während eines längeren Zeitraumes unter Nachlieferung aus der kristallinen Schicht gefördert worden. Die Gesamterscheinungen solcher Überflutungen, wie sie auch im Columbia-Snake-River-Gebiet der Staaten Washington, Oregon und Idaho im Nordwesten der Vereinigten Staaten oder den Basalten des Parana-Beckens in Südamerika, den Stornberg-Basalten Südafrikas und weiteren Vorkommen in Sibirien und Westaustralien vorliegen, geben uns Kunde von sehr großen Materialverschiebungen in tieferen Schichten der Erde, wahrscheinlich im oberen Erdmantel. Neben diesen Deckenbasalten müssen die großen Schildvulkane genannt werden, vor allem der hawaiischen Inseln, die durch sehr umfangreiche Vulkanförderungen gebildet wurden. Um auch hier eine Vorstellung über die Fördermenge zu bekommen, ist zu berücksichtigen, daß von diesen Vor-

kommen nur die obersten Spitzen der Vulkanschlote als Inseln bis zu 4000 m über die Seehöhe herausragen; rund 6000 m Höhe, d. h. der größte Anteil dieses Großvulkans mit einer Anzahl von Nebenvulkanen ist aber vom Meere bedeckt. Es baut sich auf dem Ozeanboden ein riesiger Vulkan mit verschiedenen Kratern auf, im ganzen einem Schild vergleichbar mit einem Basisdurchmesser von etwa 400 km. Auf Grund eines sehr eingehenden Studiums in neuerer Zeit, u. a. auch durch die Tiefseeforschung, hat sich auch hier gezeigt, daß der größte Anteil der hawaiischen Vulkane ebenfalls eine sehr ähnliche Zusammensetzung mit relativer Kalziumanreicherung besitzt, wie sie auch bei den Deccanbasalten und anderen Plateaubasalten vorliegt. Doch findet man in Hawaii besonders in den oberen Decken auch Basalte mit einer prinzipiell verschiedenen Zusammensetzung mit einem relativen Ansteigen der Alkalien, besonders von Natrium, so daß man früher, als man nur die aus dem Meere reichenden Anteile der Vulkane untersuchte, hier zur Annahme gelangte, daß die Basalte im Innern des Pazifik einer anderen Basaltart angehören müßten, als die Plateau-Basalte. Die verschiedene Natur dieser Alkali-Olivin-Basalte zeigt sich besonders auch in der Reihenfolge der kristallisierenden Minerale und vor allem auch in der Verschiedenheit der letzten Schmelzreste gegenüber den sogenannten Tholeiiten der Decken-Basalte. Während die den Pazifik umgrenzenden Inselbögen – etwa Sumatra, Java, Borneo und Japan – noch zur Kalzium-Alkali-Basaltprovinz gehören, finden sich innerhalb der Inselbögen, zum Festland hin, die Alkali-Olivin-Basalte.

Ebenfalls findet man im Pazifik und im Indischen Ozean selbst Vorkommen, die zu dieser Basaltart gehören.

Es hat sich bei den untersuchten Vorkommen aber ähnlich wie in Hawaii gezeigt, daß der Unterbau, der vom Meere bedeckt ist, im wesentlichen tholeiitisch ist, d. h. dem Kalk-Alkali-Typus angehört.

Diese neueren, umfassenderen Untersuchungen der natürlichen Basalt-Vorkommen haben zu dem Ergebnis geführt, daß der Tholeiit – die Kalk-Alkali-Basaltart – der bei weitem verbreitetste Basalt der Erde ist, dessen Material mit großer Sicherheit aus dem oberen Erdmantel oder aus der Übergangsschicht zur Erdkruste stammt. Weiterhin hat sich aus dem gemeinsamen Vorkommen der beiden Hauptarten der Basalte ergeben – die ihre verschiedene

Natur erst durch eine chemische Analyse und durch ihren Mineralgehalt offenbaren –, daß zwischen ihnen doch ein innerer Zusammenhang vorhanden sein muß. Wenn wir die Beziehungen zwischen den beiden Basaltarten genau kennen würden, wäre die Ermittlung des primären, im Innern der Erde entstandenen Magmas möglich. Zur Klärung dieser Frage sind die hawaiischen Inseln besonders begünstigt. Da hier durch das Nebeneinander der beiden Basaltarten die Verschiedenheiten nicht auf eine Aufnahme von Fremdmaterial aus der Erdkruste zurückgeführt werden kann, weil diese hier praktisch fehlt, müssen die Differenzierungen in dem *Basaltsystem* selbst liegen.

Das Vorkommen zweier Basaltarten war zunächst mit der Vorstellung, daß sie aus einer gemeinsamen Quelle stammen sollten, schwer vereinbar, doch stellten in den letzten Jahren Yoder und Tilley – ein amerikanischer und ein englischer Forscher – ein Modell auf Grund von Experimentaluntersuchungen auf, das recht gut den Zusammenhang zwischen den beiden Basaltarten erkennen läßt, warum nämlich solche verschiedenen Kristallisationen auftreten. Die beiden Magmen zeigen einen verschiedenen Kristallisationsverlauf, zwei Wegen vergleichbar, die von einem Gebirgsgrat in verschiedene Täler führen.

Während der vulkanischen Hauptwirksamkeit werden in Hawaii und in anderen Vulkangebieten Basalte mit Kalzium-Vormacht gefördert, mit nachlassender Aktivität erscheinen Alkali-Olivin-Basalte, teils in Wechsellage mit Tholeiiten und oft durch Tuffschichten getrennt. Solche Vermischung beider Typen, wie sie von Hawaii geschildert ist, zeigt auch die britisch-arktische Basalt-Provinz: die Inseln der Hybriden, Faeroer, Island usw. Auch hier wechseln in größeren Zeiträumen beide Basaltarten miteinander ab.

Die erwähnten jetzt bekannt gewordenen Ergebnisse der Experimental-Untersuchungen verschiedener Forscher haben nun das überraschende Ergebnis gehabt, daß durch eine Druckänderung bei gleichem magmatischem Ausgangsmaterial die erwähnte verschiedene Kristallisation erreicht werden kann. Die Drucke, die dabei angewendet wurden, entsprachen verschiedenen Erdtiefen bis über 70 km Tiefe; die Kristallisations-Temperaturen waren dabei bis auf über 1500 °C angestiegen, weil sich die

Schmelzpunkte der auskristallisierenden Silikate durch den herrschenden Druck wesentlich erhöhen, teilweise um einige hundert Grad Celsius. Besonders sind es die Minerale der Pyroxengruppe, die sich in ihrer Zusammensetzung bei den verschiedenen Drucken ändern. Ferner stellte man eine Änderung in der Reihenfolge der Kristallisation der verschiedenen Minerale in den verschiedenen Druckgebieten fest. Durch diesen sehr wichtigen Vorgang der starken Druckabhängigkeit des komplexen Systems hat man den Schlüssel in der Hand, um zu erkennen, wie sich die verschiedenen Schmelzen nach Ausscheiden der ersten Kristallart grundsätzlich ändern können. Bei einem Schub des Materials aus Tiefen von 20 bis 60 km bis zur Erdoberfläche, wie dies bei den großen vulkanischen Erscheinungen der Fall sein dürfte, wird praktisch keine Trennung in verschiedene Magmen zu erwarten sein, während bei verhältnismäßig langsamem Ansteigen eine fortlaufende Reihe verschiedener Gesteine auftreten müßte, allerdings unter einer weiteren Annahme, daß die schweren ersten Kristallarten absinken und so eine Differenzierung der Magmen eintritt. Die verschiedene Geschwindigkeit ist erklärbar. Nach der ersten Aktivität muß eine Nachlieferung aus dem kristallisierten Ausgangsmaterial erfolgen, die sicher viel langsamer ist, so daß nach der Hauptwirksamkeit eine Periode nachlassender Aktivität einträte. Dies würde eine längere Verweilzeit des Magmas in den verschiedenen Druckbereichen bedeuten und die Entwicklung verschiedener Basaltunterarten begünstigen. Mit dieser Vorstellung ist ebenfalls eine Erscheinung vereinbar, daß nämlich – wie in Hawaii – zwei benachbarte Vulkane verschiedene Basaltarten liefern können, obwohl das Material primär aus der gleichen Quelle stammen dürfte.

Diese Aufteilung in verschiedene Magmen kann natürlich vom Ausgangsmaterial abhängig sein. Ferner besteht die Möglichkeit, daß bei diesen Experimentaluntersuchungen ein wichtiger Faktor, der Sauerstoffpartialdruck, nicht gebührend berücksichtigt wurde. Hier können die Kristallisations-Erscheinungen der natürlichen Basalte weiterhelfen. Es wäre erwünscht, die mittlere Zusammensetzung des überhaupt geförderten Basaltmaterials an weiteren Vorkommen genau kennenzulernen, bei dem verschiedene Basaltarten auftreten.

Leider ist eine solche quantitative Untersuchung nicht einfach durchzuführen, vergleichbar mit der Schwierigkeit bei der sicheren Ermittlung eines mittleren Gehaltes von technischen Rohstoffen, die in großer Menge anfallen. Als einen einzigartig günstigen, wahrscheinlich sogar einmaligen Fall für diese Untersuchungen kann man hier den Vogelsberg in Hessen ansehen. Ich möchte mir erlauben, Ihnen damit etwas über unsere Erlanger Forschungen von diesem fossilen Großvulkan zu berichten, dem größten des europäischen Festlandes. Zwar kann er mit seiner Größe von 2 500 km² nicht mit den Beispielen von Hawaii oder dem Deccan-Gebiet verglichen werden, doch zeigt er, wie dies unsere Untersuchungen ergaben, ebenfalls eine starke Variation in der Zusammensetzung für die verschiedenen Ergüsse. Durch die Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Erwin Schenk, dem Leiter der Geologischen Forschungsstelle in Hungen/Vogelsberg, der die geologischen Untersuchungen im Auftrag des Zweckverbandes Oberhessischer Versorgungsbetriebe für die Wasserversorgung der umliegenden Landkreise und auch für Frankfurt mit Erfolg durchführt, haben wir durch sogenannte Kernbohrungen einige 1 000 Bohrmeter zur Verfügung, also Gesteinszylinder, um die quantitative Mittelung der Zusammensetzung an verschiedenen Bohrungen durchzuführen und damit etwas über die Ausgangsschmelze zu erfahren, vielleicht durch einen Vergleich mit anderen Großvorkommen auch über die primäre Zusammensetzung des Magmas, das in der Tiefe der Erde entsteht. Bei stärkerer Abweichung von dem zu erwartenden Mittel wäre der Hinweis auf wesentliche Aufnahmen von Fremdgestein aus der Kruste gegeben. Diese Untersuchungen erfordern allerdings eine sehr viel intensivere Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen sich überlagernden Basaltschichten als wie dies bisher bekannt war. Durch chemisch-analytische Schnellmethoden gelingt es die Anzahl der Analysen in einer tragbaren Zeit zu erhöhen und so die Zusammensetzung der einzelnen Horizonte, die übereinander liegen, sehr genau zu ermitteln. Die Abbildung eines Bohrprofils, hier von Rainrod I, soll auf Grund von etwa 100 Gesteinsanalysen*

* Analysen von den Mitarbeitern des Mineralogischen Institutes, Dr. D. Schütz und Dr. R. Schwab.

Niggli-Werte des Rainrod I.-Bohrprofils

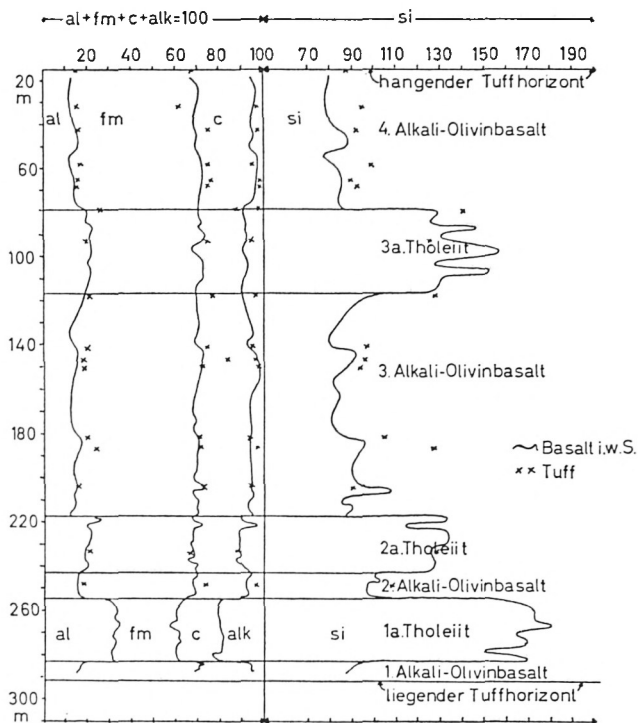


Abb. 4. Die Kurven geben die chemische Zusammensetzung der Basalte an, die sich in einem Vorkommen des Vogelsberges/Hessen mehrfach überlagern. Die Werte, die durch chemische Analysen von Tiefbohrmaterial gewonnen wurden, lassen die verschiedene chemische Zusammensetzung der Gesteinsergüsse (100 Proben) gut erkennen: Dargestellt sind sogenannte Niggli-Werte: sie sind Zusammenfassungen mehrerer chemischer Elemente zu einer Gruppe. Man erhält durch eine solche Übersicht eine bessere Vergleichsmöglichkeit.

zeigen, in welchem starkem Maße sich die Zusammensetzungen der Schichten plötzlich ändern. Es erübrigt sich hier, auf Einzelheiten einzugehen, doch zeigt diese Darstellung, daß man sowohl den Trend erkennen kann, der zu Restschmelzen mit recht kieselsäurereichen Verbindungen geht, so daß es teilweise sogar auch zur Ausscheidung von freier Kieselsäure kommt, als auch andererseits den Kristallisationsweg der zu der Ausbildung von Silikaten mit äußerst geringem Kieselsäuregehalt und zu besonderen Gesteinen als Unterart der Alkali-Olivin-Basalte führt.

Mit der verschiedenen chemischen Zusammensetzung geht eine Änderung der auskristallisierenden Minerale parallel. Es sind besonders die Pyroxene, die uns Aufschluß über die Entwicklung des Magmas und der verschiedenen Kristallisationswege geben können.

Aus den Höchstdruckversuchen ist bekannt, daß bei Drucken, die in Erdtiefen von mindestens 35 km, etwa bei dem Druck von 10 kb, vorliegen, aus einer Schmelze mit der Zusammensetzung der Deckenbasalte, ein Magnesia-Pyroxen mit mäßigem Eisengehalt als *erste* Kristallart auftritt im Gegensatz zu den Kristalli-

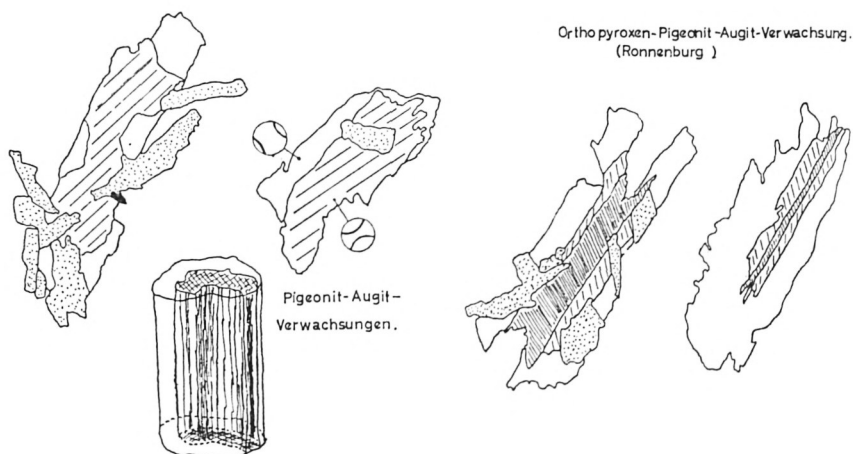


Abb. 5. Die mikroskopischen Bilder von Pyroxenen zeigen die Verwachsung chemisch unterschiedlicher Glieder in einer bestimmten Reihenfolge der Kristallisation.

sationserscheinungen bei gleicher Schmelzzusammensetzung in weniger tiefen Niveaus, in denen anders zusammengesetzte Pyroxene nach der Ausscheidung von Olivin erscheinen. Ein aufsteigendes Magma sollte dann beim Fortwachsen solcher Pyroxene vom inneren Kern bis zum Rand eine wechselnde Zusammensetzung zeigen.

Durch die Mikroelektronensonde, einer Apparatur, die chemische Analysen von Mikrobereichen liefert, gelingt es uns heute, entsprechende Pyroxen-Analysen auszuführen.* Wir können aus

* Nach Untersuchungen von Dipl. Min. G. Schorer – Erlangen.

einem solchen Bild eines Pyroxens des Vogelsberges, der mikroskopisch einheitlich erscheint, zunächst die Anteile der verschiedenen Pyroxenarten zeigen. Das Ergebnis gleicht einem Steckbrief, der uns etwas über die Lebensgeschichte enthüllt und von den Druckbereichen d. h. auch der Tiefenlage berichtet, in denen der Pyroxen sich aus der Schmelze gebildet hat.

Ein Hauptergebnis zeichnet sich jetzt bereits ab: die wiederholte Folge der beiden Hauptarten der Basalte im Vogelsberg in der gleichen Art, wie sie auch bei den anderen großen Basaltvorkommen vorliegt – aber doch mit Unterschieden der artgleichen Schichten – läßt auch hier auf die theoretisch erwartete Gesetzmäßigkeit des abwechselnden Ergusses der verschiedenen Basaltarten schließen. Die primäre Bildung des basaltischen Magmas erfolgt in solchen Tiefen, in denen man wegen der dort angenommenen wahrscheinlichen Dichte und den dort vorhandenen elastischen Eigenschaften peridotitisches Material vermutet, das aus verschiedenen Kristallarten besteht. Die physikalischen Eigenschaften lassen allerdings auch andere Gesteine mit hoher Dichte zu, die aus Pyroxen und Granat bestehen, dem bereits erwähnten Eklogit oder einem Granat-Olivin-Peridotit.

Diese Ausgangsmaterialien des oberen Erdmantels könnten basaltische Magmen aber nur als Teilschmelze liefern, wenngleich man bisher auch vermutete, daß der Eklogit wegen seiner chemischen Zusammensetzung, die dem Basalt entspricht, bei einer praktisch einheitlichen Aufschmelzung direkt ein basaltisches Magma ergäbe. Die für die Entstehung der basaltischen Schmelze entscheidende Frage, warum es überhaupt zu einer Aufschmelzung oder Teilaufschmelzung kommt, ist bisher nicht beantwortet worden. Hier liegen verschiedene Meinungen vor.

Aufschmelzungen wären möglich durch eine in der Tiefe vorhandene *Wärmequelle*, die die Schichten aufheizt, also z. B. durch radioaktive Prozesse, besonders durch den Zerfall von Uran, Thorium und Kalium. Diese Wärmeproduktion kann für lokale Aufschmelzung mit zeitweiligen Unterbrechungen wahrscheinlich nicht herangezogen werden, wenn auch grundsätzlich die Lieferung in den tiefen Erdschichten neben anderen Energiequellen auch auf dem Gehalt radioaktiver Elemente beruhen dürfte.

Eine Aufschmelzung kann aber auch durch eine Druckentlastung stattfinden. Nach der vorherrschenden Meinung muß mit einem Aufstieg des Materials gerechnet werden, d. h. aus Gebieten hohen Druckes in solche mit geringerem Druck, aber mit der mitgebrachten hohen Temperatur der tieferen Schichten. Dabei kann ein solcher Aufstieg durch stoffliche oder thermische Inhomogenitäten in dem oberen Erdmantel zustande kommen, ferner können sich in den überlagernden Schichten der Erdkruste Schwächestellen ausbilden z. B. durch große Spaltensysteme. Es wird vermutet, daß dadurch eine domartige Aufwölbung der Schichten des oberen Erdmantels erfolgt, in der Art, wie man Salzstöcke unter der Erdoberfläche kennt. Diese aufgewölbten Schichten sind also einem Berg mit sehr steilen Flanken vergleichbar, etwa von fingerförmiger Gestalt, der sich in Tiefen von rund 100 km und mehr ausbildet. Das kristalline Material steigt bei diesem Aufdringen wahrscheinlich zuerst langsam, dann aber mit der Druckverminderung immer schneller nach oben. Wesentlich bei diesem Prozeß ist, daß die aufsteigende Masse praktisch ihren Wärmehalt in das neue Tiefenniveau mit geringerem Druck mitbringt und nun bei der hohen Temperatur der Ausgangslage zu schmelzen beginnt. In dieser neuen Tiefenlage ist die Schmelzpunkterhöhung der Minerale durch Druck nicht so hoch, so daß eine Aufschmelzung wenigstens für einige Minerale eintreten kann. Es kommt zu einer Teilschmelze oder im Laufe des Aufstiegs zu einer vollständigen Verflüssigung, in jedem Falle zur Entstehung eines Magmas. Der bei einer Teilaufschmelzung entstehende Rest blutet gewissermaßen aus und ist durch den geschilderten Vorgang schließlich im wesentlichen von den Elementen Kalzium, Aluminium und den Alkalien befreit. Auch der Eisengehalt hat wesentlich abgenommen. Es bleiben nach dieser Hypothese als Überbleibsel der Teilschmelze ultrabasische Gesteine zurück, die nun ihre eigene Geschichte als hochmetamorphe Peridotite haben können. Da auch andere Hypothesen über die Herkunft des basaltischen Magmas vorliegen, – z. B. aus einer Basaltschicht selbst oder aus einem granatführenden Peridotit oder einem Eklogit, der erwähnten Gesteinsart mit basaltischer Zusammensetzung, aber viel höherer Dichte auf Grund anderer Minerale, – kommt der Frage über die Herkunft der Olivinknol-

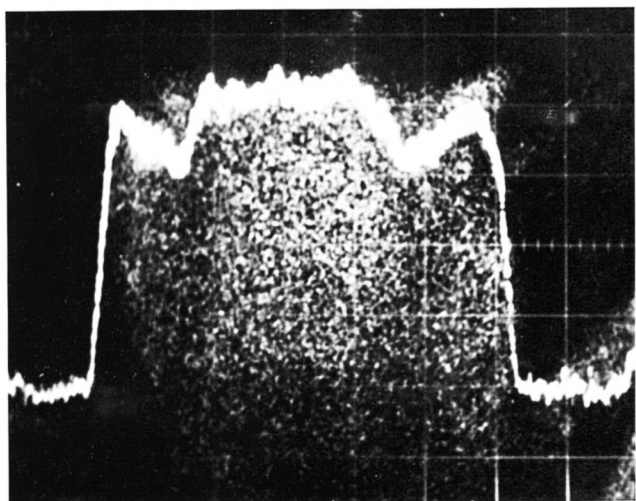
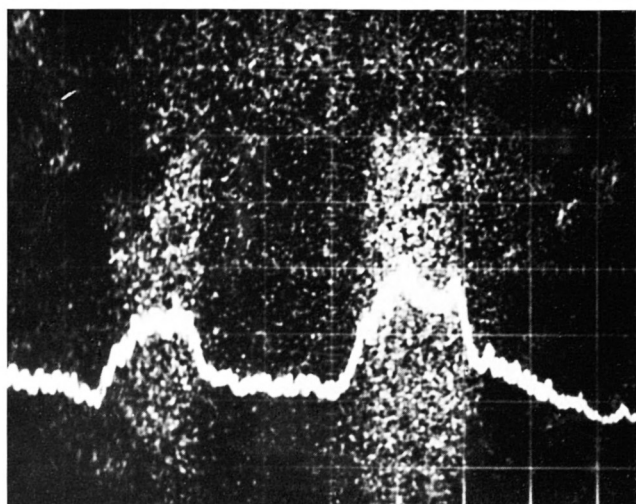


Abb. 6 und 7. Analysen komplexer Pyroxene mittels der Elektronen-Mikrosonde zeigen die sprunghafte Änderung des Kalziums- (6) und Eisengehaltes (7) beim Überschreiten der Verwachsungsgrenze an. Die Bilder zeigen die Elementverteilung über einen Bereich von etwa 0,02 mm Durchmesser. Aufgenommen wurde die lokal emittierte Röntgen-Intensität der Strahlung des zu analysierenden Elementes. Die überlagerten Kurven zeigen die Intensitätsverteilung in einem Schnitt längs einer Profillinie.

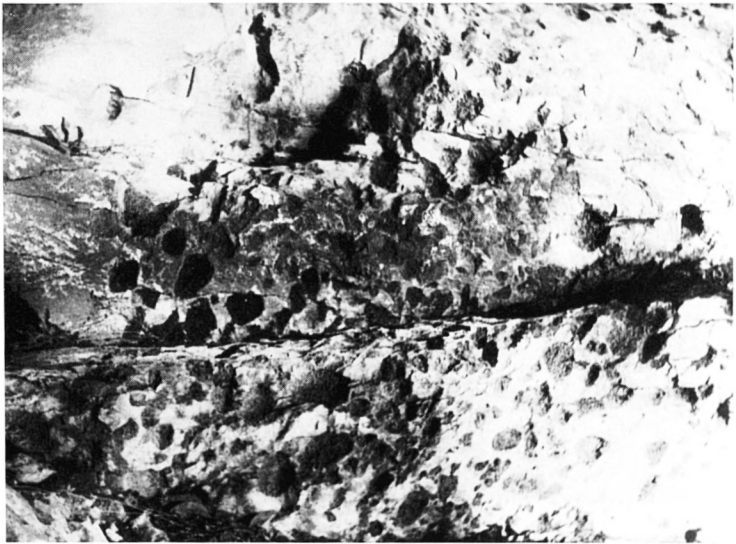


Abb. 8. Basalt mit einer angereicherten Zone von Olivinknollen (Gonterskirchen, Vogelsberg, Hessen). Die Knollen haben angenähert Faustgröße. Sie werden als Material der tieferen Erdschichten angesehen.

len der Basalte eine entscheidende Bedeutung zu. Falls man sie als die ausgebluteten Reste des primären Ausgangsmaterials für das basaltische Magma ansieht, hätte man damit ein wichtiges Belegmaterial der Tiefe. Die Abbildung von einem Vorkommen aus dem Vogelsberg zeigt, in welcher großen Menge die Magmen solches Olivinknollen-Material teilweise mitbringen können.*

Der wissenschaftliche Streit über ihre Entstehung ist alt. Man betrachtet sie einerseits als sogenannte Urausscheidungen des Magmas, also als Kristallisationsprodukte der basaltischen Schmelze in verhältnismäßig flacher Tiefenlage, die sich als Bodenkörper in sekundären Magmenkammern absetzten. Doch läßt sich zeigen, daß sie die für metamorphe Gesteine charakteristischen Züge besitzen. Hier sei nun auf die erwähnten Höchstdruckuntersuchungen hingewiesen, aus denen sich ergibt, daß die beobachtete Assoziation der Minerale dieser Peridotite erst in Tiefen von mindestens 30 km möglich ist. Ferner sind Anzeichen vorhanden, daß die Knollen, bevor sie in das basaltische Magma gekommen sind, auf Temperaturen von weniger als 1000 °C waren. Dadurch – so führen australische Autoren an – erhält die verbreitete Ansicht, zu der ich selbst wichtige Argumente beigebracht habe, daß nämlich die Basalte diese Peridotite als Fremdmaterial hervorgebracht haben, eine weitere Bestätigung. In den Alkali-Olivin-Basalten sind diese Knollen noch bei mäßigem Druck stabil, und werden unter günstigen Bedingungen mit an die Erdoberfläche verfrachtet. In den kieselsäure-reichen Kalzium-Alkali-Basalten, den Decken-Basalten, werden sie jedoch schnell gelöst und daher nur äußerst selten in diesen Gesteinen gefunden.

So darf man diese Knollen wahrscheinlich als Boten der Tiefe ansehen; es sind für die Materialfrage des Oberen Erdmantels sehr wichtige Belegstücke. Es ist zu erwarten, daß man durch weitere Untersuchungen bei Höchstdruck, die geplant sind, noch genauere Informationen über ihre Entstehung erhält, und damit auch über das Material des Oberen Erdmantels. Vielleicht wird so auch über die Peridotit-Vorkommen an der Erdoberfläche eine

* Die Abbildung stellte dankenswerter Weise Herr Dr. E. Schenk – Gießen zur Verfügung.

Entscheidung herbeigeführt, ob sie verschleppte Teile des Oberen Erdmantels sein können.

Die Folgerungen der Hypothese über die Aufschmelzung des den Oberen Erdmantel aufbauenden Materials führen zu unserer Ausgangsfrage zurück, wie nun der Obere Erdmantel wirklich zusammengesetzt ist. Wir kennen an der Erdoberfläche solche Gesteine nicht. Die Petrologie bei Höchstdrucken ist noch unbekannt, doch müßten diese Schichten, falls die Übertragung der Experimentalergebnisse der australischen Forscher Green und Ringwood auf die natürlichen Vorkommen gerechtfertigt ist, etwa nach diesen Forschern eine chemische Zusammensetzung haben, die drei Teilen Peridotit und einem Teil Basalt entspräche, durch die ein einheitliches Gestein aufgebaut würde.

So sind in jüngster Zeit zwar sehr wahrscheinliche Angaben über die stoffliche Zusammensetzung des oberen Erdmantels gegeben worden, doch ist die Frage eindeutig noch nicht geklärt. Weitere Höchstdruckuntersuchungen sind notwendig, durch die es hoffentlich gelingt, genauere Unterlagen zu liefern, um den Aufbau dieser Schicht zu klären. Die in den Tiefenlagen vermuteten Materialien müssen in Einklang mit den geophysikalischen Daten sein. Da die äußerst umfangreichen Magmenförderungen wahrscheinlich auf Grund von Inhomogenitäten im Erdmantel und von Schwachstellen in der Erdkruste möglich sind, gilt es,



Abb. 9. Übersichtskarte über das Vorkommen von Großbeben auf der Erde.

durch gemeinsame Arbeit der Forscher, den speziellen lokalen Bau der oberen Schichten in der Erde genau zu ermitteln. Als solche Schwächestellen der Erdkruste kommen besonders die Zonen in Frage, in denen häufig Großbeben auftreten, weiterhin auch diejenigen mit aktivem Vulkanismus. Es wird sich erweisen, wie die Zonen zwischen Erdkruste und Erdmantel ausgebildet sind, wo sich überhaupt solche Übergangszonen finden und wie sie gelagert sind. Die geologische Forschung wird in der Abbildung solcher Tiefenstrukturen auf die Oberfläche starken Anteil haben. Besonders sind es die Grabenzonen, wie etwa der Ostafrikanische Graben, der sich bis in das Gebiet des Roten Meeres fortsetzt oder in kleinerem Maßstab auch der Oberrheingraben, die als Untersuchungsobjekte in Frage kommen oder sind die Grenzen der Ozeane, bei denen die ultrabasischen Schichten unter diejenigen der Erdkruste untertauchen. Für diese umfangreichen Aufgaben stehen der geophysikalischen Forschung verschiedene Methoden zur Verfügung, die hier z. T. nicht einmal gestreift werden konnten. Diese Forschungen ermitteln den jetzigen aktuellen Zustand, der das Ergebnis aller geologischen Vorgänge ist, die sich im Laufe der Erdgeschichte vollzogen haben. Wir haben auch heute noch mit starken Bewegungen und Verschiebungen der Erdoberfläche zu rechnen, die ihre Ursache in den Verschiebungen des Oberen Erdmantels haben können. Die geodätische Forschung kann hier zur Lösung des Gesamtproblems viel beitragen, um solche Veränderungen zu erfassen.

So ist für die Bearbeitung des Themas „Die Erforschung des Oberen Erdmantels“ die Zusammenarbeit aller Geowissenschaften erforderlich und ein Kontakt zwischen den Forschern der verschiedenen Länder, der sich nicht nur im Austausch der Ergebnisse erschöpfen kann, sondern sich in echter Zusammenarbeit äußert, so daß besonders bei der geophysikalischen und geodätischen Forschung einheitlich umfassende Meßaufgaben angeregt und in kurzfristigen Intervallen die Berichte der einzelnen Länder ausgetauscht und Forschungsprogramme abgesprochen werden.

* Mit freundlicher Genehmigung des Verfassers, Herrn Prof. Dr. K. Jung, aus „Kleine Erdbebenkunde“, Springer Verlag, 1953.

Es ist das Verdienst der Deutschen Forschungsgemeinschaft, daß sie durch die Einrichtung eines Schwerpunktsprogrammes diese Arbeiten nicht nur in den Einzelobjekten fördert. Sie hat im starken Maße die Kontakte zwischen den Forschern der verschiedenen Disziplinen hergestellt und die Zusammenarbeit auch über die Landesgrenzen ermöglicht.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und damit der öffentlichen Hand darf hiermit der Dank der Geowissenschaften abgestattet werden, die sich bemühen, zu ihrem Teil dazu beizutragen, daß wir über die Erde – unsere Wohnstatt – eine bessere Kenntnis über ihren Aufbau und über ihre dauernden Veränderungen erhalten.

Ich möchte annehmen, daß ein gewisser Einblick in dies Geschehen der Erde auch außerhalb des Kreises der Fachleute von Interesse ist in einer Zeit, da wir daran gehen, schon die Zusammensetzung anderer Himmelskörper zu erforschen.

Literatur:

Aus dem umfangreichen Schrifttum geben die folgenden Arbeiten weitere Hinweise:

A. E. Ringwood, Mineralogy of the Mantle. S. 357–399. Aufsatz in der Buchveröffentlichung: *Advances in Earth Science*. Edited by P. M. Hurley. The M. I. T. Press, Massachusetts Institute of Technology, 1966.

H. S. Yoder and C. E. Tilley, Origin of Basalt Magmas. *Journ. Petrol.* 3, 342–532. 1962.

D. H. Green and A. E. Ringwood, The Genesis of basaltic Magmas. *Contrib. Mineral. Petrology* 15, 103–190. 1967.

L. H. Cohen, K. Ito and G. C. Kennedy, Melting and Phase Relations in an anhydrous Basalt to 40 kb. *Amer. Journ. of Sciences*, 265, 475–518. 1967.

Th. Ernst, Olivine Nodules and the Composition of the Earth's mantle. S. 321 bis 328 aus: *Mantles of the Earth and Terrestrial planets*. Edited by S. K. Runcorn, Interscience Publishers. London 1967.