

Die Entstehung von Faltengebirgen, Mittelgebirgen, von Kontinenten und Ozeanen *)

Von F. A. VENING MEINESZ, UTRECHT

Inhaltsverzeichnis

- I. Zusammensetzung der Erde, Isostasie, Abweichungen vom Gleichgewichtszustand
- II. Schwerekräftenomalien in Inselbogengebieten, das Entstehen der Geosynklinalen, Mantelströmungen
- III. Die spätere Geschichte der Geosynklinale, das Entstehen und Vergehen von Faltengebirgen und Mittelgebirgen
- IV. Der Anlageplan der geosynklinalen Zonen
- V. Konvektionsströmungen im Mantel
- VI. Das Entstehen von Kontinenten und Ozeanen, der Beginn der Erdgeschichte

I. Zusammensetzung der Erde, Isostasie, Abweichungen vom Gleichgewichtszustand

Bevor wir uns den großen Problemen zuwenden, die im Titel dieser Arbeit umschrieben sind, ist es erwünscht, einige allgemeine Daten über unsere Erde zu geben; zuerst einmal über ihre Zusammensetzung. Dies ist hauptsächlich aus seismologischen Beobachtungen abgeleitet, welche bezüglich der Dichte der durch die Erdbebenwellen durchlaufenen Einheiten Auskunft geben.

Die Erde besteht aus einer starren Kruste von ungefähr 35 km Dicke, die auf einem plastisch flüssigen Mantel von großer Zähigkeit treibt, welcher bis zu einer Tiefe von 2900 km reicht. Wie wir später sehen werden, treten hierin wahrscheinlich Strömungen auf mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr. Weiter innerhalb folgt der viel stärker flüssige Kern, in welchem Strömungen mit Geschwindigkeiten in der Größenordnung von 100 km pro Jahr angenommen werden, die also millionenmal schneller sind als die im Mantel. Unter einer Tiefe von ungefähr 5100 km nimmt im Kern die spezifische Dichte zu, woraus abgeleitet wird, daß die Kernmaterie in diesem inneren Kern sich als Folge des sehr hohen Druckes in festem Zustand befindet. Der Mittelpunkt der Erde liegt ungefähr in 6370 km Tiefe. In diesen Abmessungen ist die Abplattung an den Polen, die $\frac{1}{297}$ des Erdradius beträgt, außer acht gelassen.

Der Kern besteht wahrscheinlich aus Nickeleisen. Die Strömungen im Kern haben zugleich elektrischen Charakter und verursachen auf diese Art den Erdmagnetismus. Ihre Geschwindigkeit ist groß genug, so daß als Folge der Erdrotation merkbare Corioliskräfte auftreten, die eine Koppelung von Erdrotation und Erdmagnetismus verursachen. Aus diesem Grunde liegen die magnetischen Pole auf geringem Abstand von den Rotationspolen. Die Koppelung ist jedoch zu schwach, um eine genaue Koinzidenz hervorzurufen. Wohl ergibt sich aus der Richtung der Magnetisierungen der Gesteine — welche über hundert Millionen Jahre konstant zu sein scheinen, so daß sie Hinweise geben auf die Lage der magnetischen Pole in früheren geologischen Perioden —, daß während der letzten zehn Millionen Jahre die magnetischen Pole um den Nord-, respektive Südpol schwankten und daß ihre mittlere Lage mit diesen zusammenfiel.

*) Die Originalfassung dieser Arbeit erschien in holländischer Sprache in der Zeitschrift *Geologie en Mijnbouw* im November 1958. Prof. Vening Meinesz hat in dankenswerter Weise der Veröffentlichung einer vom Unterzeichneten besorgten deutschen Version zugestimmt. Die Arbeit scheint u. a. deshalb wichtig, weil in ihr aus geophysikalischen Erwägungen abgeleitete Hinweise über Geschwindigkeiten von Strömungen im Mantel unter der starren Kruste und auch im Erdkern enthalten sind.

H. KÜPPER

Die Strömungen im Kern werden auf die Abkühlung der an den Mantel grenzenden Außenseite des Kerns zurückgeführt, wodurch eine Konvektion im flüssigen Kern entsteht.

Der annähernd 2900 km dicke Mantel besteht wahrscheinlich hauptsächlich aus $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$, so daß auch im Mantel durch die Abkühlung als Folge von Ausstrahlung an die Oberfläche Konvektionsströmungen entstehen können, die jedoch, wie gesagt, als Folge der viel größeren Zähigkeit der Mantelgesteine eine viel kleinere Geschwindigkeit haben als im Kern. Wahrscheinlich kommt der $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ im Mantel in zwei Kristallformen vor, nämlich oben die orthorhombische (Olivin) und weiter unten die kubische von größerer Dichte, mit einer Übergangsschicht zwischen 500 und 900 km Tiefe. Die Konvektionsströmungen werden hiedurch nicht behindert, eher gefördert. Wir kommen darauf in VI. zurück.

Die 35 km dicke, starre Erdkruste ist in den Kontinenten aus zwei Lagen aufgebaut, einer Granitlage und darunter einer Basaltlage; an vielen Stellen ist die Granitlage noch bedeckt durch eine Schicht von Sedimentgesteinen. Unter den Ozeanen scheint die starre Kruste aus einer 5—8 km dicken Lage zu bestehen, in welcher die seismischen Geschwindigkeiten meist auf basaltische Zusammensetzung hinweisen, obwohl an einigen Punkten kleinere Geschwindigkeiten gefunden werden, die möglicherweise auf Granit hinweisen. Diese Lage wird meistens durch eine Lage von Sedimenten bedeckt, die auf großem Abstand von den Küsten nur selten mehr als 3 km dick sind. Unter der Basaltschicht weisen die seismischen Geschwindigkeiten auf Olivin, welcher jedoch gleichfalls bis ungefähr 35 km Tiefe als starr angesehen werden muß. Hier muß deshalb in dieser Tiefe der Übergang zu den plastischen Eigenschaften des Mantels ganz und gar von der höheren Temperatur, die dort herrscht, verursacht werden. Man kann dies auch so ausdrücken, daß die Dicke der starren Erdkruste unter den Ozeanen durch die Einflüsse von Temperatur und Druck beherrscht werden.

Abgesehen von Ausnahmen, auf welche wir im folgenden noch eingehen werden, scheint die Erde in einem Gleichgewichtszustand zu sein, d. h. daß die starre Kruste mit ihrer unregelmäßigen Topographie an der Oberfläche einer flüssigen Erde treibt, die unter dem Einfluß der Newtonschen Anziehungskraft, verbunden mit der Erdrotation, eine annähernde Gleichgewichtsform angenommen hat. Diese Gleichgewichtsform liegt sehr nahe bei einem Umdrehungsellipsoid, dessen Rotationsachse $\frac{1}{297}$ kleiner ist als der Durchmesser des Äquators; die maximale Abweichung von dem Ellipsoid ist bei 45° Breite nur einige Meter, und zwar nach innen, gerichtet, wenn Pol und Äquator beider Oberflächen zusammenfallen.

Die starre Kruste treibt hierauf; dies ergibt sich aus der Erscheinung der Isostasie, welche auf Grund von Schwerkraftmessungen festgestellt wurde. Da die Schwerkraft gleich ist der Summe der Newtonschen Anziehungskraft, welche durch alle Massen der Erde auf einen Körper an der Oberfläche ausgeübt wird, in Kombination mit einem kleinen Rotationseffekt, ergeben Abweichungen von der normalen Massenverteilung Schwerkraftsanomalien, so daß man hieraus im umgekehrten Wege über diese Abweichungen Anhaltspunkte erhalten kann. Auf diese Weise hat sich ergeben, daß annähernd überall auf der Erde das Total der Massen in einem vertikalen Zylinder eines gegebenen horizontalen Durchschnittes, von der Erdoberfläche abwärts bis zu einer Tiefe von 100 km unter das Niveau des Meeresspiegels, das gleiche ist, ganz unabhängig von den Unterschieden in den topographischen Massen an der Erdoberfläche. So findet man unter den

Gebirgen einen Minusbetrag an Masse und unter den Ozeanen einen Plusbetrag, wodurch diese topographischen Unterschiede kompensiert werden. Man hat dieser Erscheinung den Namen Isostasie gegeben. Die Folge davon ist, daß der Druck in 100 km Tiefe in der Erde überall gleich ist und man kann dies kaum anders erklären als mit der Annahme, daß die Erdkruste sich in ein treibendes Gleichgewicht einstellt auf dem plastisch flüssigen Mantel. Man kann einsehen, daß auf diese Art die Druckgleichheit verwirklicht wird und auch verwirklicht bleibt, wenn die topographischen Massen an der Oberfläche sich zum Beispiel durch Erosion oder Sedimentation ändern.

Nicht überall ist die Isostasie klar verwirklicht und dies kann man erklären, wenn man von der annehmbaren Vorstellung ausgeht, die mit der kristallinen Natur des Mantels in guter Übereinstimmung ist, daß die Mantelmaterie nicht ideal flüssig ist, sondern plastisch, worunter zu verstehen wäre, daß kleine Druckunterschiede noch nicht zum Fließen Anlaß geben; hiezu müssen sie eine bestimmte Grenze, Flüssigkeitsgrenze genannt, überschreiten. So werden dann kleine Abweichungen von der Isostasie begreiflich.

Es ergeben sich jedoch lokal auch größere Abweichungen von der Isostasie und man muß deshalb annehmen, daß es in Kruste und Mantel noch Abweichungen vom Gleichgewicht gibt. Diese Annahme ist auch in Übereinstimmung mit den Resultaten der Geodesie, welche beweisen, daß die die Erde auf einem mittleren Seenniveau umspannende Niveaufläche — Geoid genannt — nicht ganz mit der oben genannten Gleichgewichtsform der Erde übereinstimmt, sondern ausgedehnte Abweichungen davon zeigt, die jedoch nicht mehr als annähernd 40 m von der Oberfläche des Geoides nach außen oder nach innen betragen. Über das Theorem von Stokes können diese Abweichungen aus Schwerkräftenanomalien abgeleitet werden, so daß hiedurch Schwerkräftenbeobachtungen nicht nur für die Geophysik, sondern auch für die Geodesie von großer Bedeutung sind. Wir werden uns hier jedoch mit dieser Seite der Gravimetrie nicht beschäftigen. In den folgenden Abschnitten werden wir im besonderen die geophysikalische Bedeutung der Gleichgewichtsstörungen der Erde studieren, wie diese sich aus den Abweichungen von der Isostasie ergeben.

II. Schwerkräftenanomalien in Inselbögengebieten; das Entstehen der Geosynklinalen; Mantelströmungen

Bevor die Gegenstände dieses Abschnittes behandelt werden, möchte der Autor kurz einiges über Schwerkräftmessungen und Schwerkräftenanomalien mitteilen.

Die Schwerkräftbeschleunigung g , welche als Maß der Schwerkräft gebraucht wird, wird in gal ausgedrückt. 1 gal ist deshalb eine Beschleunigungseinheit; sie ist gleich 1 cm/sek.^2 . Die Schwerkräft ist ungefähr gleich 980 gal. Für geophysikalische und geodetische Zwecke der Schwerkräftmessung trachtet man eine Genauigkeit von einem Milligal (1 mgal) zu erreichen, d. h. ungefähr den millionsten Teil der Schwerkräft. Auf dem Festland glückt das ohne Schwierigkeiten. Man kann sogar eine 10mal größere, ja sogar eine 100mal größere Genauigkeit erreichen. Gegenwärtig werden hiefür elastische Gravimeter gebraucht, die im Prinzip mit einer Federwaage zu vergleichen sind, d. h. die Unterschiede in der Schwerkräft werden durch die Verformung einer Feder gemessen, die im Gleichgewicht mit einem Gewicht steht.

Für Beobachtungen zur See wurde vom Autor eine Mehrpendelmethode entwickelt, um die Messungen auszuführen. Die Schwingungszeit eines Pendels ist

von der Schwerkraft abhängig, so daß sich Unterschiede in der Schwerkraft durch Unterschiede der Schwingungszeiten verraten, welche letztere meßbar sind. Meßstörungen durch Schiffsbewegungen konnten dadurch ausgeschaltet werden, daß verschiedene Pendel gleichzeitig in verschiedenen Phasen in Schwingung gebracht wurden. Dies war möglich, falls die Schiffsbewegungen nicht zu groß waren und dies wieder konnte man durch Messungen an Bord von untergetauchten Unterseebooten ausführen. Durch das große Entgegenkommen der Königlich Niederländischen Marine konnte diese Methode auf einer großen Anzahl von langen Reisen angewandt werden, so daß auf mehr als 1000 Punkten die Schwerkraft zur See gemessen werden konnte. Auf dieselbe Weise wurde die Anzahl der Beobachtungspunkte durch ausländische Beobachter noch um einige Tausend vermehrt. Kürzlich wurde durch GRAF ein elastischer Gravimeter entwickelt, welcher gyroskopisch stabilisiert ist und durch außergewöhnlich große Dämpfung die lineare Schiffsbeschleunigung eliminiert. Man kann damit auf nicht allzusehr bewegtem Meer auch an Bord von Oberflächenschiffen Schwerkraftsmessungen ausführen.

Unabhängig davon, welche Meßmethode angewandt wird, ist es schwierig, die Genauigkeit der Messungen zur See über 3 mgal zu bringen, was jedoch für die meisten geodetischen und geophysikalischen Zwecke genügend ist. Die Ursache dieser beschränkten Genauigkeit ist, daß die Zentrifugalkraft als Folge der Erdrotation, die ja auch ein Teil der Schwerkraft ist, beeinflußt wird durch Ostwestkomponenten der Meeresströmungen, die man schwierig mit großer Genauigkeit bestimmen kann.

Die gravimetrische Aufnahme des indonesischen Archipels hat merkwürdige Abweichungen vom isostatischen Gleichgewicht ergeben. In einem 1000 km langen Streifen von einer Breite von 150—200 km kommen negative Anomalien von 100—200 mgal vor, welche man sich deshalb als Abweichungen von dem hätte vorstellen müssen, was man zu erwarten gehabt hätte, wenn diese Zone im isostatischen Gleichgewicht gewesen wäre. Diese Zone verläuft über die Inseln im Westen von Sumatra; weiterhin über einen unterseeischen Rücken südlich von Java, welcher einen Trog von 3000 m Tiefe von einem ebensolchen Trog von 7000 m Tiefe, gelegen südlich dieses Rückens, trennt; dann weiter über Timor, die Tenimberinseln, die Aru-Inseln und Ceram. NW von Ceram gibt es einen Hinweis für eine Verbindung mit einer zweiten Zone von starken negativen Anomalien, welche von E Celebes über die Molukensee — wo die größte negative Anomalie von etwa 200 mgal gefunden wurde — zwischen N Celebes und Halmaheira nach den Talaudinseln verläuft. Beiderseits dieser Zonen wurden weite Gebiete mit positiven Anomalien gefunden, so daß das ganze Gebiet sich im Mittel wahrscheinlich ungefähr im isostatischen Gleichgewicht befindet, vielleicht sogar einen schwachen Schwereüberschuß zeigt. Die negativen Anomalien in diesen Zonen sind schwächer entwickelt an den Seiten des Inselbogens W von Sumatra und E von den Philipinen; sie betragen dort im allgemeinen weniger als 50 mgal negative Abweichung (Fig. 1).

Derartige schmale Zonen von ausgeprägten negativen Anomalien mit anschließenden positiven Bereichen wurden auch in anderen Inselbögen gefunden, z. B. im W Indien und bei Japan. Man darf dies also mit gutem Grund als eine allgemeine Erscheinung betrachten, und es scheint uns wichtig, die allgemeine Bedeutung davon zu untersuchen. Im Zusammenhang damit, daß für Indonesien ein großes Beobachtungsmaterial für alle Gebiete zur Verfügung steht,

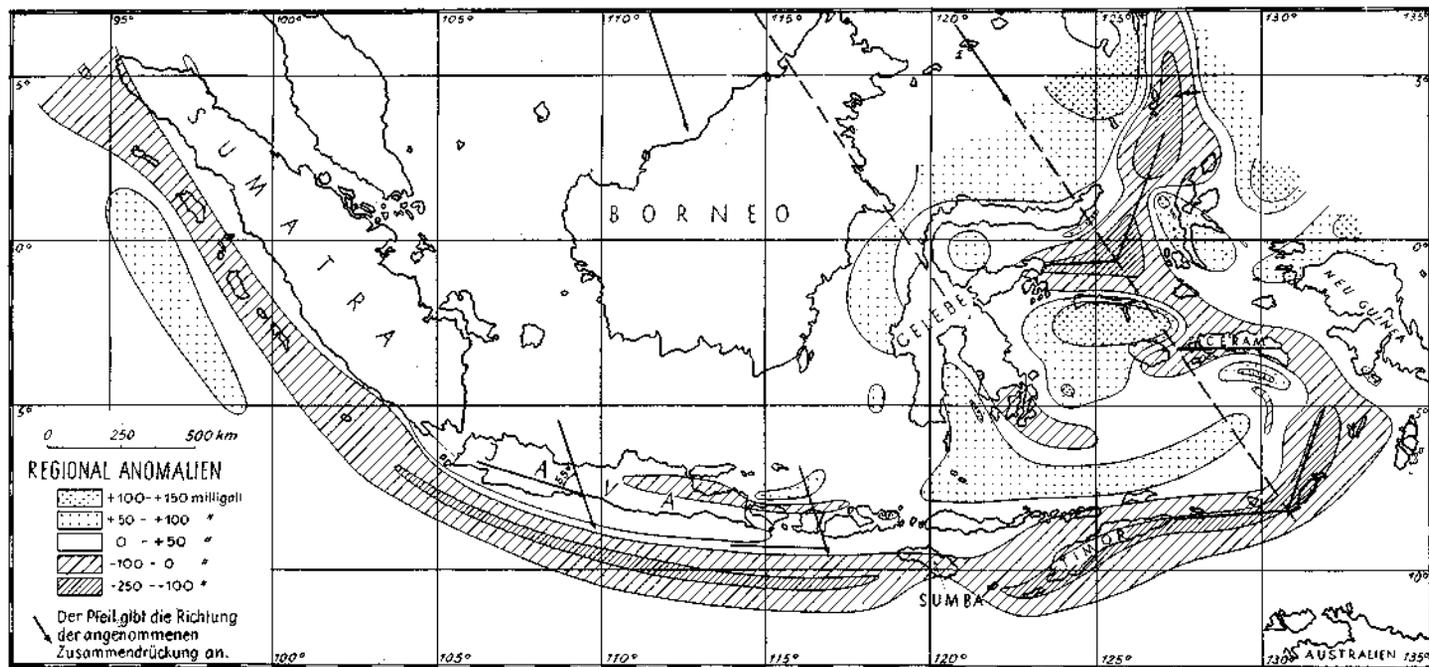


Abb. 1. Schwerkraft-Anomalien im Indonesischen Archipel. (Die Pfeile geben die Richtungen der relativen Bewegungen der Archipelschollen hinsichtlich der umgebenden Krustenteile an.)

wichtiger Hinweis scheint uns die Tatsache zu sein, daß in allen in der Anomaliezone gelegenen Inseln intensive Faltungen und Überschiebungen vorkommen, deren Streichungsrichtung mit dem Verlauf der Anomaliezone übereinstimmt. Dies weist hin auf einen starken Zusammenschub der Erdkruste in der Zone quer auf die Längsrichtung der Zone. Es ergibt sich die Frage, ob man damit ein Massendefizit in der Zone, welches die negativen Anomalien erklären könnte, deuten kann. Dies ist nun tatsächlich der Fall. Und wir machen dabei Gebrauch von der Theorie von BYLAARD über die plastische Verformung, welche bereits von ihm selbst auch auf Krustenverformungen angewandt wurde.

Wenn die 35 km dicke starre Erdkruste einem horizontalen Zusammendruck ausgesetzt wird, welcher darin Druckspannungen verursacht, die die Elastizitätsgrenze überschreiten, so daß in der kritischen Zone ein langsames plastisches Fließen des Gesteinsmaterials auftritt, dann entsteht hiedurch eine Krustenverdickung. Wir müssen annehmen, daß die auf diese Art verdickte Krustenzone im isostatischen Gleichgewicht auf der Mantelschichte treibt. In diesem Fall muß jedoch die Anschwellung der Kruste nach unten größer sein, als nach oben, auf dieselbe Art, wie man das auch von treibenden Eisbergen kennt, wo der untergetauchte Wurzelteil neunmal größer ist als jener Teil, der ober Wasser sichtbar ist. Bei einer Dichte der ganzen Kruste von 2,67 (Granit) und des Substrates von 3,27 (Olivin) dürfte die nach unten gerichtete Krustenbeule $2,67 : (3,27 - 2,67) = 4,45$ mal jenem Abstand entsprechen, den sie als Höhe an der Oberfläche zeigt. Wir wissen jedoch, daß der tiefste Teil der Kruste aus Basalt mit einer Dichte von ungefähr 3,0 besteht. Stellt man dies in Rechnung, dann ergibt sich, daß der nach unten gerichtete Teil der Krustenbeule im Vergleich zu den nach oben gerichteten Teilen noch bedeutend größer sein müsse.

Als Folge dieser ungleichen Verdickung der Kruste an der Oberfläche und an der Unterseite liegt die Resultierende der in der Kruste vorhandenen Druckspannungen, die im unverformten Krustenteil in der Mitte liegt, in dem verformten Krustenteil nicht mehr in der Mitte sondern darüber. Die Folge davon ist, daß die Druckspannungen sich hier nun ungleich verteilen; an der Oberseite des Querschnittes müssen sie ein Maximum erreichen, an der Unterseite ein Minimum. Infolgedessen wird die Kruste an der Oberfläche stärker plastisch zusammengedrückt und an der Unterseite weniger stark. Man kann sich leicht vorstellen, daß sich hieraus eine Hinunterbiegung der Kruste ergibt, welche selbst wieder die exzentrische Lage der Druckresultierenden noch verstärkt und damit auch zugleich die Geschwindigkeit der Hinunterbiegung der Kruste selbst. Die ganze Erscheinung hat den Charakter eines nach unten gerichteten Einknickens der Kruste.

Wegen der sehr hohen Pseudo-Viskosität der Gesteine erfordert der beschriebene Vorgang, obwohl er den Charakter eines Knickes hat, doch eine lange Zeitdauer; es erfordert einige Millionen Jahre bevor die Einknickung der Kruste die Ausbeulung an der Oberfläche aufgehoben hat. Hiernach jedoch setzt sich die Absenkung schneller fort und wir erhalten an der Oberfläche eine fortdauernde Senkung, welche der Geologe als Bildung einer Geosynklinale zu nennen gewohnt ist. Fig. 2 zeigt die Verformung der sich in dieser Zone verdickenden und absenkenden Kruste, wie diese nach 25 oder 30 Millionen Jahren aussehen dürfte. Die Synklinale ist dann ungefähr 5 km tief. Diese Daten über den Zeitverlauf bedeuten natürlich nicht mehr als die Angabe einer Größenordnung; denn sie beruhen auf der äußerst unsicheren Schätzung der Pseudo-Viskosität der Kruste. Die angegebene Dauer kann deshalb auch kleiner oder größer sein.

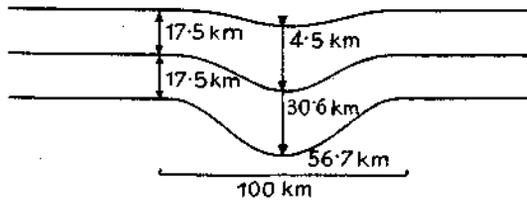


Abb. 2. Plastisches nach-unten-Knicken und Verdickung der Erdkruste. (Es wurde angenommen, daß die Kruste aus zwei Lagen gleicher Dichte, einer granitischen und einer basaltischen besteht.)

Wenn die Krustenformung durch andauernden Zusammendruck noch weiter zunimmt, wird die mathematische Behandlung schwieriger. Man muß annehmen, daß dann die Geosynklinale mehr und mehr zusammengedrückt wird zu einer nach unten gerichteten Falte, wobei die Sedimente intensiv gefaltet und über-

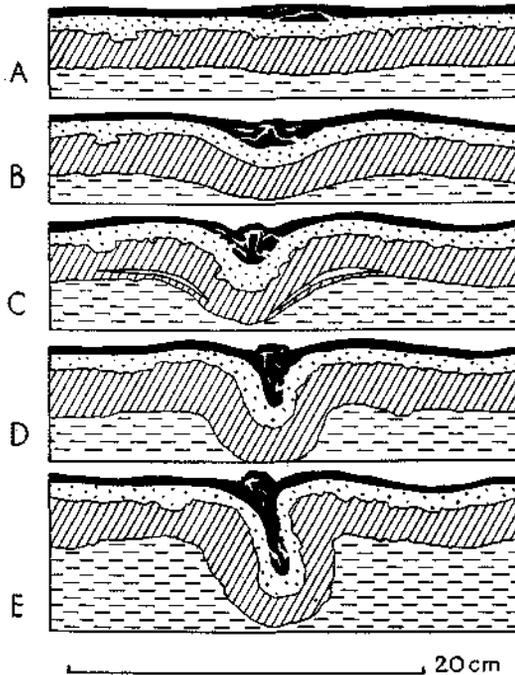


Abb. 3. Fünf Stadien eines Experimentes von Kuenen; horizontale Zusammendrückung eines plastischen Paraffin-Wachs-Körpers, der auf Wasser treibt und aus drei Lagen besteht, deren Steifheit nach unten zunimmt.

schoben werden. Man könnte dies die Katastrophenphase im Ablauf der Erscheinungen nennen. Die Experimente von KUENEN mit einer auf Wasser treibenden plastischen Lage von Wachs und Paraffin — die in drei Lagen unterverteilt war, wobei die höchste die weichste und die tiefste die steifste Lage war —, welche er durch horizontalen Druck zusammenschob, dürften hievon einen Eindruck geben. Fig. 3 zeigt ein Bild von fünf aufeinanderfolgenden

Phasen eines der Experimente. Die Verdickung in der oben abgebildeten Beginnphase wurde durch KUENEN vor dem Beginn des Experimentes angebracht. Die Ineinanderfaltung der obersten Schicht im Kern der Falte gibt wahrscheinlich ein nicht allzu gutes Bild von den oben erwähnten Überschiebungen der Sedimente in einer Geosynklinale. Im übrigen zeigt dieses Experiment auf deutliche Weise, wie die treibende Kruste durch die Zusammendrückung nach unten knickt.

Bevor wir weiter auf diese großen Krustenverformungen in geosynklinalen Zonen eingehen, möchten wir die Aufmerksamkeit darauf lenken, daß als Folge des Einknickungsprozesses die zentrale Zone bedeutend tiefer weggedrückt wird als es dem isostatischen Gleichgewicht entsprechen würde. Dies bedeutet hier also ein ausgesprochenes Massendefizit, so daß begreiflich wird, daß diese Zone starke negative Schwerkräftenomalien zeigt. Wir haben damit eine Erklärung gefunden der früher genannten, in Inselbogengebieten wie Indonesien vorkommenden Zonen von großen negativen Anomalien, welche zusammenfallen mit tektonischen Einengungszonen der Erdkruste, die durch Faltungen und Überschiebungen der Gesteinslagen gekennzeichnet sind. In Gebieten fern von Kontinenten oder Inseln manifestiert sich die Einknickung der Erdkruste an der Oberfläche durch Tiefseetröge; dorten können nämlich keine Sedimente in der Synklinale abgesetzt werden. Dies ist vollkommen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen; die Topographie in den Zonen negativer Anomalien wechselt von großen Höhen zu tiefen Trögen. Die Tröge sind also nicht isostatisch kompensiert. Ihr Vorhandensein weist auf die Anwesenheit von horizontalen Drucken in der Erdkruste. Sollten diese verschwinden, dann müßten auch die Tröge verschwinden. Aus dem Vorhandensein von Tiefseetrögen auf einer großen Anzahl von Punkten in der heutigen Zeit ist der Beweis abzuleiten, daß wir momentan in einer tektonisch aktiven Periode leben. Ein weiterer Beweis hierfür ergibt sich aus dem Vorkommen von Erdbeben.

Wir möchten nun die Geschichte einer Geosynklinale verfolgen. Aus der Geologie und Geomorphologie ist es bekannt, daß auf die Bildung der Geosynklinale und die damit zusammenhängende Sedimentation eine Auffaltung von Inselrücken in der Synklinale folgt. Wir haben hievon die Erklärung bereits gegeben. Erst nachdem die Faltungsperiode beendet ist, beginnt die gesamte synklinale Zone zu steigen und sich ein Hochgebirge zu bilden. Allmählich kann sich dieses Ansteigen auch auf das Vorland ausdehnen, wo sich dann Mittelgebirge formen. Eines der genauest studierten Beispiele für diese Entwicklungsgeschichte sind die Alpen, welche erst zum Hochgebirge wurden, nachdem die Faltungsphase, die dort durch tektonische Lagerung so deutlich dokumentiert ist, beendet war. Danach entstanden im Vorland die französischen und deutschen Mittelgebirge, wie Vogesen und Schwarzwald. Das Ansteigen setzt sich fort bis in den Süden der Niederlande, wo es momentan in Limburg und N Brabant noch deutlich fortwirkt.

Dieser ganze Entwicklungsvorgang läßt sich geophysikalisch folgendermaßen erklären. Wenn die Geschwindigkeit der Mantelströmungen wie erwähnt abnimmt, vermindert sich auch der Druck in der Erdkruste. Infolgedessen kann sich das isostatische Gleichgewicht in der synklinalen Zone einstellen, was als Folge der ansehnlichen Krustenverdickung in den kontinentalen Gebieten ein Ansteigen zum Hochgebirge verursachen muß. Merkwürdigerweise hat diese Krustenverdickung im ozeanischen Krustenteil nur eine kleine Anschwellung zur Folge, da hier der Olivin nur durch eine Lage von 3—5 km Basalt von

werden wir diese Untersuchung vor allem für dieses Gebiet durchführen. Ein einem spezifischen Gewicht von 3,0 bedeckt ist. Eine Anschwellung in gleichem Maßstab wie die, welche auf dem Kontinent ein Gebirge von 5000 m entstehen läßt, kann, wie leicht nachzurechnen ist, nur einen untermeerischen Rücken von etwas weniger als 1000 m Höhe entstehen lassen. Derartige Rücken findet man tatsächlich auf vielen Stellen in den verschiedenen Ozeanen.

Bevor wir nun die Geschichte der Geosynklinalen weiter verfolgen, möchten wir erst die Ursache der Zusammendrückung der Kruste behandeln, welche die Synklinalen entstehen läßt. Aus verschiedenen Gründen müssen wir diese von Mantelströmungen ableiten, welche in der darauf treibenden Kruste Spannungen verursachen, und nicht von der Kontraktion der Kruste als Folge der Abkühlung des Erdinneren. Ein erster Grund hiefür ist, daß wie bereits angedeutet, in Inselbögen wie dem Indonesischen die Krustenzusammendrückung an den Flanken viel geringer ist als in der Mitte des Bogens; die negativen Anomalien sind an den Flanken ungefähr -50 mgal gegen -130 bis 200 mgal in der Mitte. Dies wird begreiflich, wenn man annimmt, daß die ganze Krustenscholle innerhalb des Bogens durch eine Unterströmung nach SSE getrieben wird, jedoch nicht durch eine Krustenkontraktion, welche letztere an den Flanken des Bogens einen gleichgroßen Zusammendruck verursachen müßte, wie in der Mitte.

Der zweite Grund für die Annahme von Mantelströmungen ergibt sich aus den Polverschiebungen, welche sich aus den verschiedenen Magnetisationsrichtungen in Gesteinen verschiedenen Alters ableiten lassen. Wie bereits angedeutet, nimmt man gegenwärtig an, daß der Erdmagnetismus durch Kernströmungen mit elektrischem Charakter entsteht, und daß diese schnell genug sind, um als Folge der Erdrotation eine merkbare Coriolisbeschleunigung hervorzurufen, welche die magnetische Polachse zur Rotationsachse der Erde hinzieht. Die mittleren Lagen beider Achsen über längere geologische Perioden fallen deshalb zusammen. Aus der Magnetisierungsrichtung der Gesteine früherer Perioden kann man deshalb die Lage der Rotationsachse hinsichtlich der Erdkruste ableiten und diese scheint eben veränderlich gewesen zu sein. Im Karbon lag der Nordpol scheinbar in der Nähe der Sandwich-Inseln. Danach ist er über Japan zu seinem gegenwärtigen Standort gewandert. Da man kaum annehmen kann, daß die Drehungsachse der Erde im Raum diese Bewegung mitgemacht hat, wird man zum Schluß geführt, daß die Erdkruste sich hinsichtlich der Achse bewegt hat. Wenn man Mantelströmungen annimmt, dann ist eine derartige Verlagerung durchaus begreiflich; es wäre nämlich unwahrscheinlich, daß das resultierende Moment, welches von diesen Strömungen aus an der Kruste angreift, Null sein sollte, so daß eine Drehung der Kruste durchaus erklärlich ist. Es ergibt sich hieraus ein neues Argument zu Gunsten des Vorkommens von Mantelströmungen.

Ein weiteres Argument, das wir hier noch erwähnen möchten, liegt in der Tatsache, daß in derselben Zeitperiode, in welcher Faltungen und Überschiebungen in Geosynklinalen auf eine horizontale Zusammendrückung der Erdkruste weisen, in anderen Gebieten Zugspannungen auftreten. Eine der Erscheinungen, die in diese Richtung weisen, ist die Bildung großer Senkungszonen wie z. B. die Ebene des Rheintales oder die Senkungszone des Toten Meeres. Es ist klar, daß die Tatsache, daß in derselben Zeit diese beiden verschiedenen Arten von Krustenverformungen entstehen, nicht auf Kontraktion weisen kann, die ja überall eine Zusammendrückung der Kruste verursachen

müßte. Mantelströmungen können dagegen in der gleichen Zeitperiode an einigen Stellen Druck- und an anderen Stellen Zugspannungen hervorrufen. Wir wenden uns nun der weiteren Verfolgung der Geschichte der Geosynklinale zu.

III. Die spätere Geschichte der Geosynklinale; das Entstehen und Vergehen von Faltungsgebirgen und Mittelgebirgen.

Es wurde bereits besprochen, wie bei dem Langsamerwerden der Mantelströmung und hierauf folgend mit der Druckverminderung in der Kruste sich das isostatische Gleichgewicht in der Geosynklinale einstellt. Die hier verdickte plastische Kruste wird dadurch in den Kontinenten der Anlaß zur Entstehung von Hochgebirgen.

Auf zweierlei Art kann ein Kettengebirge verschwinden. Zum ersten wird die Oberfläche durch Erosion angegriffen, wodurch tiefe Flußtäler entstehen. Zum zweiten wird allmählich die bei der Hinunterknickung der Kruste eingestülpte Gebirgswurzel, die dort herrschenden höheren Temperaturen annehmen und dadurch plastisch werden. Dies wird zur Folge haben, daß, wie auf Fig. 4

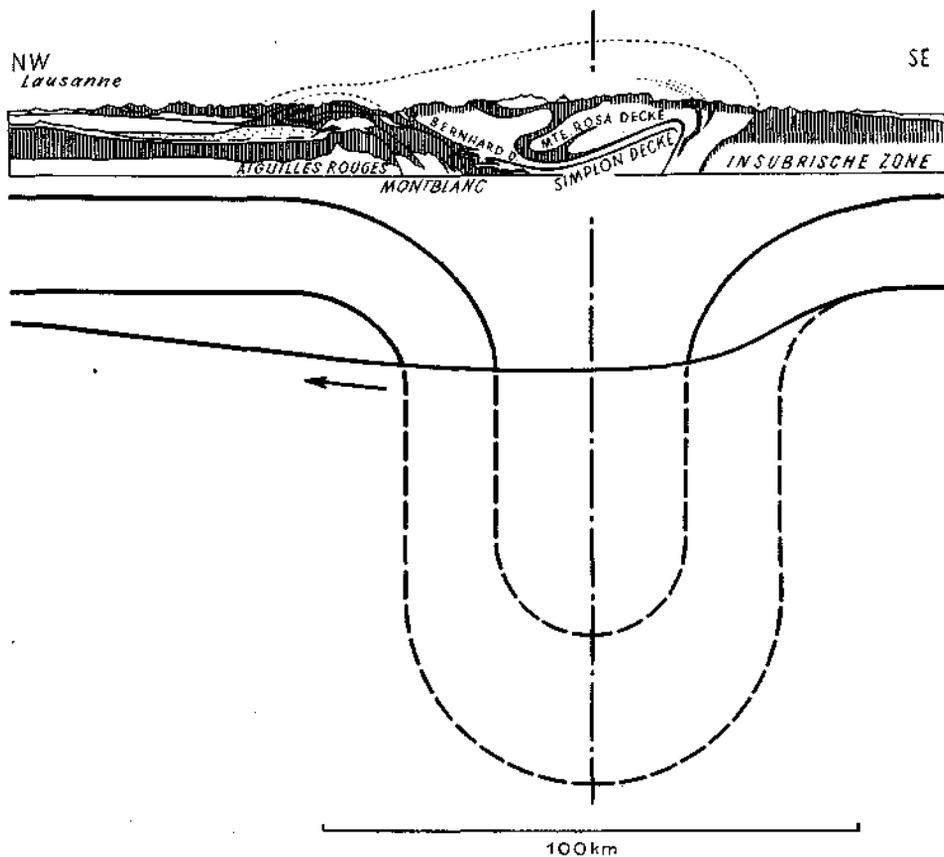


Abb. 4. Das Schmelzen und Abfließen der nach unten geknickten Wurzel. (Darüber Staub's Profil über die St. Bernhard-Decke, schematisch).

dargestellt, diese leichtere Wurzel flacher werden und das Material hievon sich seitlich an der Unterseite der starren Kruste verbreiten wird. Dabei wird das isostatische Gleichgewicht bestehen bleiben; die Kruste wird durch diese Unterpolsterung mit leichtem Krustenmaterial beginnen zu steigen. Im Vorland des Kettengebirges hebt sich also die Erdoberfläche und diese Hebung wird schrittweise auf immer größeren Abstand vom Kettengebirge um sich greifen. Es bilden sich so Mittelgebirge. Diese fortschreitende Unterwanderung von leichtem Krustenmaterial an der Unterseite kann akzentuiert werden durch unter der Kruste hinziehende Mantelströmungen, deren Geschwindigkeit wohl geringer geworden ist, jedoch nicht vollkommen nachließ.

Die im N und W der Alpen entstandenen Mittelgebirge sind mit dieser Erklärung in guter Übereinstimmung. Es zeigen sich wohl einige Faltungerscheinungen, doch ist ihr Entstehen hauptsächlich auf ein vertikales Ansteigen zurückzuführen. Wie gesagt, erstreckt sich dieses Ansteigen jetzt bis in den südlichen Teil von Holland. Dieses Ansteigen dauert noch an, wie sich aus dem Vergleich von 3 Nivellements in Holland ergibt, welche in einem Zeitabstand von ungefähr 40 Jahren ausgeführt wurden.

In den Westalpen hat die Bildung von Mittelgebirgen nur in nördlicher und westlicher Richtung stattgefunden, so daß man annehmen muß, daß das Abströmen von der Wurzel fast nur einseitig gewesen ist. Bei den Ostalpen scheint dies anders zu sein; es macht den Eindruck, daß hier die Bildung von Mittelgebirgen nach beiden Seiten ausgegriffen hat und damit auch das Abströmen des Wurzelmaterials. Hieraus kann man vielleicht Schlüsse ableiten über noch vorhandene Mantelströmungen.

Die vorgelegte Erklärung über das Entstehen der Mittelgebirge in Europa ist in guter Übereinstimmung mit dem extremen Zusammenschub des starren Krustenteiles in den Alpen, welcher durch HEIM und andere Geologen aus Faltungen und Überschiebungen abgeleitet wurde und auf ungefähr 200—300 km geschätzt wurde. Wenn man einen Zusammenschub von 250 km annimmt, ergibt dies bei einer Dicke der starren Kruste von 35 km eine Überschußmenge Krustengestein per laufendem km von etwa $250 \times 35 = 8750 \text{ km}^3$. Diese Menge, umgerechnet auf die volle Länge der Alpen, muß bei Außerachtlassung von all dem, was durch die Flüsse auf sehr große Abstände wegtransportiert wurde, annähernd zurückzufinden sein in dem Extravolumen von Alpen und Mittelgebirgen plus den hiezugehörigen Krustenwurzeln an der Unterseite der Kruste. Die Alpen mit den dazugehörigen Wurzeln alleine berechnet, ergeben ein viel zu kleines Volumen; doch wenn man das Volumen der Mittelgebirge mit zugehörigen Wurzeln dazuzählt, dann stimmt es ziemlich gut. Es scheint sich hieraus überzeugend zu ergeben, daß nicht nur die Alpen, sondern auch die Mittelgebirge auf den großen Zusammenschub der Alpen zurückzuführen sind.

Die völlige Auslöschung von Alpen und Mittelgebirgen zugleich wird nur durch die Erosion hervorgerufen werden können, es sei denn, daß auch tiefere Vorgänge im Mantel, z. B. in der sogenannten Übergangsschichte zwischen 500 bis 900 km Tiefe auf die Höhenlage der Erdoberfläche von Einfluß sind. Ausgeschlossen ist dies nicht. Wir kommen hierauf noch zurück.

IV. Der Anlageplan der geosynklinalen Zonen

Es wurde bereits erwähnt, daß die Zonen mit starken negativen Anomalien, die sich im Entwicklungsstadium der Geosynklinalen bilden, in Inselbögen auftreten. Als Beispiel wurde der Indonesische Archipel besprochen. Wir wer-

den uns nun dem Problem zuwenden, warum sich ein Bogen bildet. In Wirklichkeit handelt es sich nicht um einen reinen Bogen, sondern um die Aneinanderfügung von geraden Teilen, die zusammengenommen ungefähr einen Bogen bilden. So schließt der annähernd gerade Sumatra-Teil an der Sundastraße unter einem Winkel von $25-30^\circ$ an den geradlinigen Java-Teil an und dieser eckige Verlauf setzt sich auch weiter fort. Das gleiche gilt für den Mariannenbogen, den japanischen Bogen, den Antillenbogen und andere Inselbögen.

Wir haben gesehen, daß die Synklinalbildung einsetzt mit einer plastischen Verdickung der Erdkruste unter dem Einfluß von horizontalen, einachsig ausgerichteten Druckspannungen, deren Betrag die Elastizitätsgrenze überschreitet. Die Richtung in der eine derartige plastische Verformungszone in einer ebenen Platte von geringer Dichte in bezug auf ihre horizontalen Abmessungen entsteht, ist ein Problem der Ingenieurkunst, das durch zahlreiche Experimente untersucht wurde, deren theoretischer Hintergrund durch BYLAARD behandelt wurde. Man fand, daß Verformungszone und Spannungsrichtung einen Winkel von 55° einschließen, sowohl nach der einen wie nach der anderen Richtung; diese zwei Richtungen werden HARTMANNsche Richtungen genannt.

Angewandt auf unser Problem kann man sagen, daß der gesamte Mittelteil eines Inselbogens diesen zwei Richtungen gut entspricht. Hiezu darf angemerkt werden, daß die Längen in diesen Richtungen nicht gleich sein müssen. Man findet diese zwei Richtungen angegeben auf der Kartenskizze von Indonesien, worin die Zonen der negativen Anomalien ebenfalls verzeichnet sind. Gleiche Resultate ergeben sich auch für andere Inselbögen.

An den Flanken der Bögen, so z. B. in Sumatra, tritt ein anderer Mechanismus der Krustenverformung auf. Wir sind bereits früher zum Schluß gekommen, daß die schwächeren Anomalien an den Flanken der negativen Anomalienzonen darauf weisen, daß die gesamte Krustenscholle innerhalb des Bogens sich hinsichtlich der angrenzenden Krustenteile nach SSE bewegt. Die Bewegung an der Sumatraflanke ist deshalb von großem Teil ein Entlangsschieben, wobei die Insel nach SE sich verschiebt hinsichtlich der Scholle des angrenzenden Indischen Ozeangebietes. Daneben besteht auch eine Zusammenschubkomponente lotrecht auf die Anomalienzone, die eine gewisse Tendenz zur Überschiebung der Sumatrascholle über die Ozeanscholle ergibt. Dieses Entlangsschieben wurde auch bei Erdbeben direkt beobachtet. So beobachtete beim Erdbeben von 1892 der Leiter von der damaligen Vermessungsbrigade von Holländisch Indien, J. J. A. MÜLLER, eine relative Bewegung von rund 2 m nach SE von 2 Triangulationspunkten an der NE-Seite der Bruchfläche hinsichtlich von zwei anderen Triangulationspunkten im SW derselben Fläche.

Es ist begreiflich, daß dieser Mechanismus des Entlangsschiebens sich in einer anderen Richtung hinsichtlich der durch die Mantelströmung hervorgebrachten relativen Krustenschollenbewegung einstellen muß, als die im vorigen Abschnitt besprochene Synklinalbildung. Die Theorie der Mechanik dieses Schubes wurde durch MOHR aufgestellt und später durch CHAMBERLIN, SHEPART und weiter durch ANDERSON und KING, HUBBERT auf geologische Erscheinungen angewendet. Die Richtung hängt ab von den inneren Reibungswinkeln; für den hier besprochenen Fall kann man den Winkel zwischen diese Richtung und der der relativen Schollenbewegung auf $25-30^\circ$ schätzen. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem Winkel von $25-30^\circ$, welchen die Längsachsen von Sumatra und Java miteinander einschließen. Zusammengenommen müssen nämlich beide Winkel 55° ergeben, welchen die Verformungszone Süd von Java als auch

von Java selbst mit der einachsigen Druckspannung in der Kruste einschließt, d. h. mit der relativen Bewegungsrichtung der gesamten Archipelscholle hinsichtlich der sie umgrenzenden Kruste.

Wir leiten also ab, daß die Inselbögen aus vier geraden Teilen bestehen müssen, welche an den Flanken Winkel von $25\text{--}30^\circ$, und in der Mitte einen Winkel von 5° einschließen, mit der relativen Bewegungsrichtung der umschlossenen Krustenscholle. Dieses Resultat ist in guter Übereinstimmung mit dem, was wir in Wirklichkeit sehen.

V. Konvektionsströmungen im Mantel

Bereits im Ende des zweiten Teiles wurden die wichtigsten Gründe angegeben, warum man annehmen muß, daß episodische Strömungen im Mantel vorkommen. Perioden von 30—60 Millionen Jahren von großer Aktivität, während welcher Gebirgsbildung auftritt, wechseln ab mit ruhigen Perioden von 150—250 Millionen Jahren. Aus den geologischen Daten scheint sich zu ergeben, daß diese Erscheinung nicht im strengen Sinn periodisch ist; die Perioden von Aktivität und Ruhe sind wahrscheinlich nicht immer gleich.

Man kann diese Erscheinungen erklären durch die aus verschiedenen Gründen wahrscheinliche Annahme, daß die Mantelmaterie plastisch ist, d. h. daß sie eine bestimmte Elastizitäts- oder Festigkeitsgrenze hat, die überschritten werden muß, bevor die Strömung in Gang kommt. Dies ist auch in guter Übereinstimmung mit der kristallinen Natur des Mantels. Wahrscheinlich liegt diese Grenze bei $10\text{--}20\text{ kg/cm}^2$. Die Folge davon ist, daß die Abkühlung an der Außenseite des Mantels durch die Wärmeausstrahlung der Erde diesen instabil macht — die Temperaturverminderung ergibt eine Schrumpfung und deshalb Vergrößerung der Dichte, so daß schwerere Materie über leichtere zu liegen kommt — aber, daß diese Instabilität noch nicht zur Strömung führt. Erst wenn eine Nebenerscheinung im oberen Teil des Mantels einen Druckabfall in horizontaler Richtung ergibt, groß genug, um die Elastizitätsgrenze zu überschreiten, dann kommt die Strömung zustande. Diese hat den Charakter einer im vertikalen Sinn den Mantel in seiner vollen Höhe umfassenden Umschichtung. Wir wissen aus den relativen Bewegungen von Krustenschollen, die auf dem Mantel treiben, so z. B. die zwei Krustenteile, die sich beiderseits des San Andreas Fault in Kalifornien bei Erdbeben gegeneinander bewegen, daß die Strömungsgeschwindigkeit der Mantelströmungen in der Größenordnung von einigen Zentimetern per Jahr ist. Auch dies stimmt mit der Voraussetzung überein, daß es sich um Deformierung kristalliner Materie handelt. Die Wärmeleitung innerhalb der Erde ist so gering, daß man sie bei diesen kleinen Strömungsgeschwindigkeiten außeracht lassen kann und annehmen darf, daß die Mantelmaterie ihre Temperatur mit sich mitführt. Die Folge davon ist, daß die Strömung nach einem Viertel Umlauf ihre Maximumgeschwindigkeit erreicht hat; die abgekühlte Oberschicht nimmt dann den absteigenden Ast des Stromes ein und die Unterlage von höherer Temperatur den aufsteigenden, so daß dann der Dichteunterschied beider Äste, welcher die treibende Kraft des Konvektionsstromes ist, ein Maximum erreicht.

Nach einem halben Umlauf der Strömung ist die treibende Kraft ganz verschwunden und sie kommt zum Stillstand; die an der Oberfläche abgekühlte Materie, welche also die größere Dichte hat, ist nun an der Unterseite des Mantels gelandet und die Materie höherer Temperatur von der Unterseite im Dach,

so daß das Gleichgewicht hergestellt ist, sofern die Festigkeitsgrenzen nicht noch kleinere Abweichungen davon bestehen lassen.

Dieser Umschichtungsprozeß umfaßt in einem halben Umlauf die Höhe der Mantelschicht und hat bei den sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten eine Dauer von ungefähr 40 bis 60 Millionen Jahren und in dieser Zeit hat die Kruste an der Oberfläche Geosynklinalen gebildet mit den damit verbundenen Gebirgen und dann kommt die Strömung zur Ruhe. Die darauffolgende tektonische Ruheperiode muß so lange gedauert haben als nötig war, um die obere Mantel-lage durch Wärmeausstrahlung wieder abzukühlen und die Untermantellage vom Endkern her wieder auf hohe Temperaturen zu bringen. Beide Vorgänge werden durch kleinere Konvektionssysteme im Mantel beschleunigt, aber sie nehmen doch eine Zeitspanne von 150—250 Millionen Jahren in Anspruch. Wenn dann ein Nebenprozeß eintritt, welcher im oberen Teil wieder einen genügenden horizontalen Druckabfall entstehen läßt, dann kann eine neue Strömungsperiode mit Erscheinungen tektonischer Krustenverformung ins Rollen kommen. Die genannten Druckabfälle im oberen Teil des Mantels können z. B. durch Temperaturunterschiede, als Folge von Radioaktivitätsunterschieden oder tektonischer Bewegung in der Kruste entstehen.

Der Umstand, daß das Eisenmagnesiumsilikat des Mantels wahrscheinlich in zwei Modifikationen vorkommt, und zwar in den obersten 500 km mit Dichten von ungefähr 3,3 als Orthorhombische, und in den untersten 2000 km, Dichte ungefähr 4,0, wahrscheinlich als Kubische oder Spinellform, dazwischen mit einer 400 km dicken Übergangsschicht, dies alles ergibt bei Temperatur- und Druckunterschieden einen größeren Dichteunterschied als sich von der Thermik ableiten ließe. Bei näherer Betrachtung ergibt sich hieraus, daß die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Konvektionsströmungen mehr als viermal größer ist, als man dies bei rein thermisch bedingten Dichteunterschieden erwarten könnte. Dies ist eine starke Stütze für die Hypothese der Mantelströmungen.

VI. Das Entstehen von Kontinenten und Ozeanen; der Beginn der Erdgeschichte

Eine mathematische Untersuchung der Verteilung der Topographie an der Erdoberfläche, deren wesentlichste Züge das Vorhandensein von Kontinenten und Ozeanen ist, ergibt einen verborgenen mathematischen Zusammenhang, der auf eine Korrelation hinweist mit der Art und Weise, auf welche sich die Strömungen in der ganzen Erde und im Mantel der Erde verbreiten müßten. Dies könnte in der Annahme eine Erklärung finden, daß die kontinentale Krustenmaterie — meistens Sial genannt, nach den darin überwiegend vorkommenden Elementen Silizium und Aluminium — ursprünglich auf einer flüssigen Erde trieb, durch die Strömungen zu Schollen zusammengeschweißt wurde und so die Kontinente bildete. Wir werden diesen Gedankengang im folgenden näher ausführen und dabei zu einer annehmbaren Hypothese über den Beginn der Erdgeschichte gelangen. Vorher besehen wir uns jedoch die Verteilung der Kontinente noch näher.

Zuerst soll hier auf die allgemein bekannte Tatsache gewiesen werden, daß eine Halbkugel besteht, auf welcher viel mehr Kontinente vorkommen als auf der anderen Halbkugel. Der Mittelpunkt der erstgenannten Halbkugel liegt im Schwarzen Meer S von Odessa und E von Konstanz; der Mittelpunkt der zweitgenannten liegt an den Antipoden, d. h. etwas E von Neuseeland. Es gibt

jedoch einen noch näheren Zusammenhang mit der Verteilung der Kontinente. Diese scheint nämlich zusammenzuhängen mit der Verteilung der Mantelströmungen, wobei oberhalb der absteigenden Strömungen Kontinente liegen und oberhalb der aufsteigenden Ozeane. Dies ist in Übereinstimmung mit dem oben skizzierten Gedankenkonzept.

Aus diesen Daten ergibt sich folgende Hypothese über den Anfang der Erdgeschichte. Ausgehend von einer bis an die Oberfläche flüssigen Erdkugel, in welcher sich weder Kruste noch Kern gesondert hatten und die deshalb noch als eine homogene Flüssigkeitskugel anzusehen war, wird die Wärmeausstrahlung an der Außenseite zu Konvektionsströmungen weiter drinnen geführt haben. Man kann beweisen, daß die wahrscheinlichste Strömung ein durch den Kern gehender Strom ist, welcher sich an der Oberfläche ausbreitet bis zur Gegenseite und von dort zum Kern zurückfließt.

Die schrittweise Differentiation aus der Erdmasse von einerseits schwerer Materie, hauptsächlich Nickeleisen, welche die Strömung im Kern zurückläßt, und von leichter Materie, hauptsächlich Sial, welche an der Oberfläche abge sondert wird und dort durch die Strömung zu einem Urkontinent zusammen gedriftet wird, dies alles läßt also den Erdkern aus Nickeleisen entstehen, umgeben von einem Mantel, auf welchem ein Urkontinent treibt. In Hinblick auf das gegenwärtige Verhältnis der Oberfläche von Kontinenten zu Ozeanen von ungefähr 1 zu 2 dürfte man annehmen können, daß dieser Urkontinent den dritten Teil der Erdoberfläche eingenommen hat.

Die Bildung des Kernes dürfte das Ende der zentralen Strömungen gewesen sein. Es ergab sich späterhin — noch immer als Folge der Wärmeausstrahlung an der Erdoberfläche — ein System von Mantelströmungen, das den gebildeten Urkontinent auseinanderzog und die Teile davon als große Schollen über den absteigenden Stromästen zurückließ. Damit waren die gegenwärtigen Kontinente gebildet, deren Umrisse noch deutlich auf einen ursprünglichen Zusammenhang hinweisen. Viele Forscher, z. B. WEGENER, haben auf diese Ähnlichkeit des Küstenverlaufes hingewiesen, deren bekannteste jene der Ostküsten und Westküsten des Atlantischen Ozeans sind. Die Trennung der verschiedenen Kontinente voneinander muß jedoch viel früher vor sich gegangen sein, als durch WEGENER angenommen wurde, nämlich in einem frühen Abschnitt der Erdgeschichte, zu einem Zeitpunkt, wo sich noch keine starre Kruste unter den Ozeanen gebildet hatte, so daß die Kontinente durch Mantelströmungen noch frei beweglich waren, wogegen die Materie der Kontinente schon starr genug war, um ihre Form während der Bewegungen zu erhalten.

Kann man jedoch erklären, daß das Sial an der Erdoberfläche früher erstarrte als die Mantelmaterie in den zwischen den Sialschollen gelegenen Gebieten, welche später Ozeane werden sollten? Diese Erklärung ist zu geben. Das Sial ist nämlich leichter als die Mantelmaterie, so daß sie selbst beim Erstarren leichter blieb und weiter an der Oberfläche trieb. Die Mantelmaterie jedoch dürfte wohl gleichzeitig an der Oberfläche erstarrt sein, doch die dabei auftretende Verdichtung wird sie wohl schwerer gemacht haben, so daß diese erstarrten Teile wieder untersanken und in der Tiefe wieder aufgeschmolzen wurden. Es wird deshalb im Beginn der Erdgeschichte eine ziemlich lange Zeitperiode gewesen sein, während welcher die Kontinentalschollen bereits erstarrt waren, dagegen die Mantelmaterie an der Oberfläche zwischen den Kontinentalschollen noch nicht. Diese skizzierte Entstehungsgeschichte der gegenwärtigen Kontinentverteilung kann man auf diese Art sehr wohl erklären.

Im weiteren Verlauf muß jedoch auch die Mantelmaterie an ihrer freien Oberfläche erstarrt sein und damit wird die Bewegung der Kontinente als Folge von Mantelströmungen zu einem Ende gekommen sein; seither bildet die starre Erdkruste ein Ganzes. Spätere Mantelströmungen konnten darin nur Störungen in Schwächezonen verursachen, welche, wie wir in Abschnitt II gesehen haben, zu Bildung von Geosynklinalen führten. Im Abschnitt V wurde schließlich dargelegt, daß diese Strömungen meist in einem halben Umlauf die Mantelschicht erfassen, episodisch auftraten mit langen dazwischengeschalteten Ruhepausen.

Diese kurze Skizze der Hauptzüge der Erdgeschichte findet hiemit ihr Ende. Übersieht man sie als Ganzes, dann steht man unter dem tiefen Eindruck der großen Zusammenhänge all dieser Erscheinungen.

Literatur

- VENING-MEINESZ, F. A.: Gravity Expeditions at Sea, I, II, III, IV (II und IV über Schwerkraftsinterpretierung der Resultate), Niederländische Geodätische Kommission, Kanaalweg 4, Delft.
- VENING-MEINESZ, F. A.: Indonesian Archipelago: a geophysical study, Bull. Geol. Soc. of Amer. Feb. 1954.
- VENING-MEINESZ, F. A.: Plastic buckling of the earth's crust: the origin of geosynclines, Bull. Geol. Soc. of Amer. Spec. pap. on the earth's crust, 1955.
- VENING-MEINESZ, F. A.: The geophysical History of a Geosyncline, Contrib. in Geophysics: in honor of Gutenberg, Pergamon Press, 1958.
- VENING-MEINESZ, F. A.: De mantel en de korst der aarde, Nederl. Tydschrift voor Natuurkunde, 24, 5, 1958.
- Buch zusammen mit HEISKANEN, W. A.: The Earth and its Gravity Field, 1958, McGraw-Hill, New York.

Bericht über geologische Studien in Südkalifornien

VON CHRISTOF EXNER

Das Winterhalbjahr von Anfang Oktober 1957 bis Mitte März 1958 verbrachte ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am geologischen Institut des Pomona-College (Vorstand: Prof. Dr. DONALD B. MCINTYRE). Dieses College befindet sich etwa 65 km östlich des städtischen Zentrums von Los Angeles. Es handelt sich um ein Privatcollege im Neuengland-Stil (gegründet 1887), dessen geologisches Institut schon seit Jahrzehnten besonders auf die Erforschung der ausgedehnten kristallinen Gebirgsketten Südkaliforniens und deren Minerale ausgerichtet ist.

Nördlich über den Orangenhainen, die das College umrahmen, ragt mit unmittelbarer jungtektonischer Bruchstufe das kristalline Gebirge der San Gabriel Mts. 3000 m über die Ebene aufwärts. Nach Osten blickt man auf die noch höheren kristallinen Wüstenketten der San Bernardino und San Jacinto Mts. Der südkalifornische Batholith, welcher die südliche Fortsetzung des Sierra Nevada-Plutons darstellt, baut mit prächtigen Kontaktaufschlüssen die vegetationsarmen Hügelzüge im SE auf. Und nach W, gegen den Pazifik zu, erstreckt sich das von einigen jungtektonischen Antiklinalen (Hügelketten) durchzogene, einförmig und