

(Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.)

Airy oder Pratt?

Von

M. Toperczer.

Mit 1 Textabbildung.

Zusammenfassung. Reflexionsseismische Beobachtungen aus jüngster Zeit haben gezeigt, daß es technisch durchaus möglich ist, auch den tiefen Untergrund nach dieser Methode zu untersuchen. Damit scheint der Streit, ob die isostatische Kompensation eher nach dem Modell von PRATT oder dem von AIRY in der Natur verwirklicht wird, einer weiteren Überprüfung zugänglich zu sein. Die Modelle von PRATT und AIRY mit ihren begrifflichen Schwierigkeiten werden diskutiert und es wird eine Synthese der beiden Auffassungen vorgeschlagen. Zum Schlusse wird darauf hingewiesen, daß es zwei Möglichkeiten für das Auftreten von Reflexionshorizonten geben könne: stoffliche Diskontinuität und sprunghafte Zustandsänderung im homogenen Medium. Deswegen kann auch die Reflexionsseismik zunächst keine eindeutige Antwort auf Fragen nach dem Aufbau der Kruste geben.

Summary. Recent seismic reflection observations have shown the technical possibility of investigating also the deep underground by this method. Thereby the question whether the isostatic compensation follows in nature rather the model of PRATT or that of AIRY seems to be open to further examination. The models of PRATT and AIRY and their fundamental difficulties are discussed and a synthesis of both principles is proposed. Finally, two possibilities for the occurrence of reflection horizons are indicated: a material discontinuity and an abrupt change of state in the homogeneous medium. For this reason, seismic reflection observations do not yield, at the moment, an unequivocal answer to the question of the structure of the earth's crust.

Résumé. Des expériences récentes de sondage par réflexion ont prouvé qu'il est pratiquement possible d'explorer également le sous-sol profond par cette méthode. Cela permet, semble-t-il, de réexaminer la question de savoir si la compensation isostatique se fait en réalité selon le modèle de PRATT ou celui de AIRY. L'auteur discute ces deux modèles en exposant leurs difficultés de principe et en propose une synthèse. Il fait enfin remarquer qu'un horizon réfléchissant peut apparaître sous deux formes: discontinuité de matière ou changement brusque de constitution dans un matériau homogène. C'est pourquoi la prospection sismique par écho ne peut pour le moment résoudre le problème fondamental de la structure de l'écorce terrestre.

In jüngster Zeit ist die Frage nach der Beschaffenheit des Untergrundes unterhalb der großen Gebirge, ob es gemäß der Hypothese von AIRY eine

Gebirgswurzel gebe, wieder besonders in den Mittelpunkt des Interesses getreten. Dies vor allem deswegen, weil heute die Möglichkeit besteht, mit den Methoden der Reflexionsseismik, wie erfolgreich durchgeführte Versuche schon bewiesen haben, eine Untersuchung des tiefen Untergrundes auf eine andere Weise, als durch die doch unsichere und nicht zwingende Deutung der Schwereanomalien durchzuführen.

Bis heute war die Deutung der Anomalien des Schwerefeldes der einzige Weg zur Erforschung der Massenverteilung im tieferen Untergrund. Unsere derzeitigen Vorstellungen über den Aufbau der Kruste sind vorwiegend auf diese Art abgeleitet. Erst einige seismische Untersuchungen der letzten Jahre haben gewisse Zweifel an der Gültigkeit oder Plausibilität dieser Vorstellungen hervorgerufen. Bevor jedoch auf die Möglichkeiten der Seismik eingegangen werden soll, muß die Realität der bis jetzt gebräuchlichen Krustenmodelle aus der Art ihrer Ableitung überprüft werden.

Das irdische Schwerefeld besteht aus zwei Anteilen von ganz verschiedener Größe. Das Potential der Schwere W in einem beliebigen Punkt ist aus zwei Anteilen U und T zusammengesetzt:

$$W = U + T;$$

in U sind dabei die Glieder bis einschließlich der zweiten Ordnung zusammengefaßt, die der regelmäßigen Massenordnung des Niveausphäroides entsprechen, in T sind alle Restglieder höherer Ordnung, die mit den zusätzlichen Massenunregelmäßigkeiten im Aufbau der Erde zusammenhängen, enthalten. Die sehr plausible und durch andere Überlegungen zu stützende Annahme aus diesem Aufbau des irdischen Schwerefeldes ist die, daß zum größten Teil die die Erde aufbauenden Massen sich im Zustand des hydrostatischen Gleichgewichtes befinden; nur ein kleiner Teil der Erdmasse, die Kruste, entspricht dieser Gleichgewichtsbedingung nicht, aber auch ihre Anordnung kann keine willkürliche sein, sie muß die Bedingung isostatischen Gleichgewichtes erfüllen. Dabei ist aber zu bemerken, daß alle aus dem Schwerepotential abgeleiteten Schlußfolgerungen über eine bestimmte Form der Massenverteilung nicht zwingend sind, da ein und dieselbe Potentialverteilung durch unendlich viel verschiedene Massenordnungen erzeugt werden kann.

Das hydrostatische Gleichgewicht ist dadurch bestimmt, daß die Niveauflächen der Schwerkraft, also die Flächen $W = \text{const}$, selbst auch Flächen gleicher Dichte und gleichen Druckes sein müssen, da bei Abweichungen von dieser Bedingung Kräfte auftreten würden, die eine Veränderung der momentan vorhandenen Massenordnung zur Folge hätten. Ein solcher Zustand ist aber kein Gleichgewicht. Stabil ist eine derartige Massenordnung im hydrostatischen Gleichgewicht dann, wenn sie gleichzeitig einem Minimum an potentieller Energie im Schwerefeld entspricht. In diesem Fall können spontane Massenverlagerungen unter dem Einfluß des Schwerefeldes allein nicht auftreten.

Anders aufgebaut ist das isostatische Gleichgewicht der äußeren Kruste. Schon der bloße Augenschein der physischen Erdoberfläche mit

ihren großen Unregelmäßigkeiten zeigt, daß die Kruste sich nicht im Zustand des hydrostatischen Gleichgewichtes befinden kann. In ihrem Bereich können die Niveauflächen der Schwerkraft nicht Flächen gleichen Druckes sein. Dennoch darf die Lagerung der Massen auch in der Kruste keine willkürliche sein. Das hydrostatisch geschichtete Erdinnere wird nach außen durch eine Grenzfläche abgeschlossen, die selbst eine Niveaufläche ist, für die aber noch die Bedingung des hydrostatischen Gleichgewichtes, daß sie auch eine Fläche gleichen Druckes sein soll, gelten muß. Es muß daher über einer jeden Flächeneinheit dieser Grenzfläche ein gleich großes Gewicht lagern und dies ist jene Bedingung, die die Massenordnung oberhalb der Grenzfläche, im Bereich der Kruste, erfüllen muß. Ungenauer kann man auch von Massengleichheit sprechen, wenn man eng begrenzte Teile der Erdoberfläche meint, in deren Bereich die Schwerkraft sich nicht beträchtlich ändert.

Da die Niveauflächen im Krustenbereich keine Flächen gleichen Druckes sind, entstehen in der Kruste Spannungen, die sich nur solange nicht ausgleichen können, als die Festigkeit des Krustenmaterials nicht überschritten wird. Dieser Zustand kann sich aber nicht bis zu beliebiger Tiefe fortsetzen, da schließlich bei Extrapolation bis zum Erdmittelpunkt dieser kein Ort bestimmten Druckes mehr wäre; der Druck wäre vielmehr abhängig von der Richtung, aus der der Erdmittelpunkt erreicht wird. Einer solchen Festigkeit, wie sie zum Aufrechterhalten der stets größer werdenden Spannungsunterschiede bei unregelmäßiger, vom hydrostatischen Gleichgewicht abweichender Massenlagerung notwendig wäre, sind aber die Massen des Erdinnern unterhalb einer bestimmten Tiefe nicht mehr fähig. Alle bisher diskutierten Modelle über den Aufbau des Erdinnern gehen deshalb vom hydrostatischen Gleichgewicht aus, das durch die Zusammensetzung des Schwerepotentials W nahegelegt wird, und betrachten daher die Zustandsveränderlichen des Modells als alleinige Funktionen des Radius, oder exakter ausgedrückt: als konstant auf der Niveaufläche $W = \text{const.}$ Eine derartige Massenverteilung könnte man auch eine CLAIRAUTSche nennen, weil ein Hauptergebnis von CLAIRAUTS Untersuchungen über die Figur der Erde auch so ausgesprochen werden kann, daß sich die Erde in der Hauptsache wie eine rotierende, inhomogene Flüssigkeit verhält.

Die Annahme des hydrostatischen Gleichgewichtes in der Tiefe erscheint auch deshalb plausibel, weil bei den dort anzunehmenden Temperaturen eine ausreichende Plastizität des Materials wahrscheinlich ist, die zusammen mit der *andauernd* wirkenden Schwerkraft die hydrostatische Schichtung der Massen herbeiführt. Es sei dazu noch bemerkt, daß die Schwerkraft noch an der Grenze des Erdkerns, also in rund 2900 km Tiefe, von gleicher Größe wie an der Erdoberfläche ist und selbst in 5000 km Tiefe noch mehr als die Hälfte ihres Oberflächenwertes beträgt. Ihre ordnende und anordnende Wirkung erstreckt sich also bis in sehr beträchtliche Tiefen und würde auch ausreichen, die Gesamtmasse der Erde nach einem stabilen Gleichgewicht anzuordnen. Doch soll auf diese Frage, weil nicht zur Absicht des vorliegenden Aufsatzes gehörig, nicht näher eingegangen werden.

Eine isostatische Massenordnung kann nur dann durch längere Zeit bestehen bleiben, wenn sie in einem Material entsprechend großer Festigkeit aufgebaut wird. Bei einer isostatischen Massenordnung fallen die Flächen gleichen Druckes und die Niveauflächen der Schwere nicht zusammen. Es bestehen daher Druckgradienten, die bestrebt sind, die tatsächlich vorhandene Massenordnung in eine solche überzuführen, die dem hydrostatischen Gleichgewicht entspricht. Nur dort, wo die Festigkeit des Materials größer ist als die vorhandenen Spannungen, kann die isostatische Massenlagerung bestehen bleiben. Nach unseren heutigen Anschauungen über den Aufbau der Erde sind solche Festigkeitsverhältnisse nur im Krustenbereich zu finden. Die Tiefe der Ausgleichsfläche, die die beiden Zustandsbereiche des isostatischen und des hydrostatischen Gleichgewichtes voneinander scheidet, ist von den Materialkonstanten und den sie beeinflussenden Zustandsgrößen, Temperatur und Druck, abhängig.

Kleine Abweichungen vom Zustand des isostatischen und hydrostatischen Gleichgewichtes sind immer vorhanden. Im Bereich der Kruste wissen wir aus den Ergebnissen der Schweremessungen, daß die isostatische Massenlagerung nur in einem gewissen Durchschnitt erfüllt ist. Isostatische Kompensation besteht nicht für einen beliebig kleinen Bereich oder ein jedes Detail der Oberfläche. Abweichungen von der isostatischen Kompensation in der Kruste, soweit solche Abweichungen über einem größeren Bereich, also im Durchschnitt auftreten, müssen auch auf das hydrostatische Gleichgewicht des Erdinnern zurückwirken. Es können, wegen der Zähigkeit der Massen in der Tiefe, deshalb auch kleine Abweichungen vom Zustand des hydrostatischen Gleichgewichtes durch endliche Zeiten erhalten bleiben. Es besteht eine weitgehende Tendenz zur Verwirklichung des isostatischen und hydrostatischen Gleichgewichtes, ohne daß diese Zustände erreicht würden. Denn die Erde ist dauernd, heute schon verhältnismäßig langsam ablaufenden Zustandsänderungen unterworfen, die einen wirklichen Gleichgewichtszustand ausschließen. Da aber die Änderungen nur langsam erfolgen, können auch die Abweichungen vom Gleichgewichtszustand sehr klein sein.

Die Zustandsänderungen der Erde werden durch die dauernd einwirkenden Kräfte bewirkt. Diese sind die Folge eines Energieumsatzes. Energie wird von außen der Erde zugeführt und in ihrem Innern freigesetzt. Die exogenen Kräfte verändern andauernd die Erdoberfläche und erzeugen hier Massenverlagerungen, durch die das isostatische Gleichgewicht verändert wird und die den Kompensationsmechanismus dauernd anregen. Die Massen der Tiefe haben einen sehr hohen Energieinhalt, aus dem die endogenen Kräfte gespeist werden. Die Niveauflächen sind auch Flächen gleicher Zustandsvariabler und damit auch Flächen gleicher thermodynamischer Energie. Würden in einer Niveaufläche verschiedene Energieniveaus enthalten sein, so würde es dadurch zu einer Energieentfaltung und damit auch zu einer Massenumlagerung kommen, die den Gleichgewichtszustand bzw. den quasistatischen Zustand zerstören würden. Schon deswegen müssen Niveauflächen im Zustand des hydrostatischen Gleichgewichtes auch Flächen gleicher Arbeitsfähigkeit im erwei-

terten Sinn sein. Umgekehrt kann deswegen angenommen werden, daß eine Störung des hydrostatischen Gleichgewichtes auch zu einer Energieentbindung aus dem vorhandenen Vorrat führen wird, die notwendig ist, um den Gleichgewichtszustand wieder herzustellen.

Zwei ganz verschiedene Modelle über das Zustandekommen der isostatischen Kompensation beim Aufbau der Kruste haben das geophysikalische und vor allem das geologische Denken bis heute beherrscht, die Hypothesen von AIRY und PRATT, die beide gleichzeitig und aus dem gleichen Anlaß, zur Erklärung der am Himalaya beobachteten Massendefekte, entstanden sind. Beide Hypothesen sind statisch, etwa vergleichbar der statischen Theorie der Gezeiten, sie suchen nur die isostatische Massenkompensation zu erklären, ohne aber auf die Entstehung oder die Weiterentwicklung eines derartigen Zustandes Rücksicht zu nehmen; sie enthalten überdies in ihrem Erklärungsprinzip einen extremen Gegensatz.

Die nachstehenden Abbildungen 1a und b zeigen für das gleiche Oberflächenprofil, das schematisch ein Gebirge in der Nähe einer Meeresküste, also entsprechend große Gegensätze der physischen Erdoberfläche darstellt, den Kompensationsmechanismus einmal nach den Anschauungen von PRATT (Abb. 1a) und nach der Hypothese des Schwimmgleichgewichtes von AIRY (Abb. 1b).

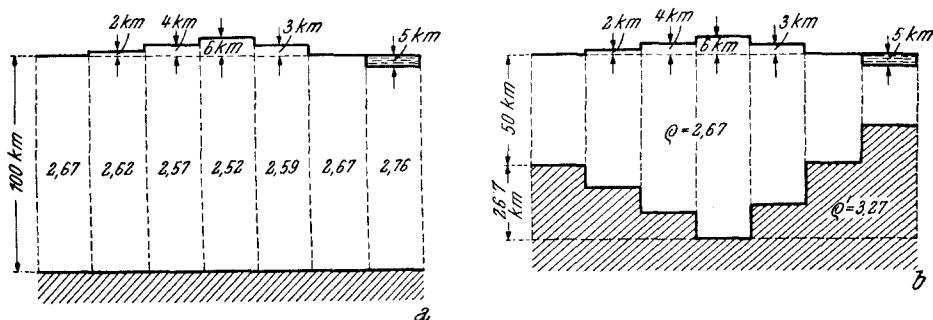


Abb. 1. Isostatisches Gleichgewicht nach PRATT a) und AIRY b).

Nach PRATT erfolgt die Kompensation ausschließlich in den Massen der Kruste allein, ohne Einbeziehung des Substrats. In einer bestimmten Tiefe liegt die Ausgleichsfläche, die hier auch eine materielle Trennfläche gegen die Massen des Substrats ist. Auf ihr ruhen die Massensäulen der Kruste. Die Massenkompensation wird dadurch erzeugt, daß das Produkt aus mittlerer Dichte der einzelnen Säule mit ihrer Höhe eine Konstante ist. Dies gibt die für die Kompensation nötige Massenkonzanz einer jeden einzelnen Säule. Die „normale“ Dichte hat eine Massensäule, die von der Ausgleichsfläche sich bis zum Meeresniveau erstreckt. Massensäulen, die das Meeresniveau überragen, kann man sich durch Expansion, solche die unterhalb des Meeresniveaus endigen, durch Kompression einer Normalssäule entstanden denken. Bei diesem Modell ist die Massenkonzanz in einfacher Weise verwirklicht, schwieriger ist es, einen Vorgang anzu-

geben, durch den die jeweils notwendige Aufblähung oder Einsenkung der Krustenmasse erzeugt wird.

Im Modell von AIRY entsteht die Kompensation als Folge eines Schwimmgleichgewichtes der in die Massen des Substrats, des Sima, das als zähplastisch vorgestellt wird, eintauchenden Sialschollen der Kruste. In diesem Modell ist die mittlere Dichte für Sial und Sima konstant, variabel ist nur die Gesamtausdehnung der einzelnen Sialsäulen in vertikaler Richtung. Die bis zum Meeresniveau reichende Säule ist auch hier (Abb. 1 b) als gleich dicht wie beim PRATTSchen Modell angenommen worden. Die Dimensionen sind also in beiden Bildern streng vergleichbar. Beim AIRYschen Modell ist die physische Trennfläche zwischen Sial und Sima keine Ausgleichsfläche, denn je höher die Massen der Erdoberfläche sich auftürmen, um so tiefer muß auch ihr Fuß in das Substratum eintauchen. Die über einer jeden Flächeneinheit der wirklichen Ausgleichsfläche liegenden gleichen Gewichte werden bei diesem Modell durch eine Kombination von Sial- und Simasäulen zusammengesetzt. Deswegen ist hier die Ausgleichsfläche jene Niveaufläche, die die am tiefsten in das Sima eintauchende Sialsäule gerade tangiert. Wesentlich für dieses Modell ist, daß der für sein Zustandekommen notwendige Mechanismus eines Schwimmgleichgewichtes leicht verständlich ist — wenngleich man das „Schwimmen“ noch genauer beschreiben müßte —, daß ein Zusammenwirken zwischen Sial und Substratum für die Herstellung der isostatischen Kompensation nötig ist, und daß schließlich die Trennfläche zwischen Sial und Sima keine stabile Gleichgewichtsfläche bezüglich der Druckverteilung ist. In ihr bestehen Spannungen, die, falls sie größer sind als die Festigkeit der eintauchenden Sialsäule, bestrebt sein werden, das Sial nach oben, das schwerere Sima nach unten zu verlagern, wie es eben der stabilen Lagerung in einem Schwerfeld entspricht. Eine derartige Lagerung, bei der im Bereich einer Niveaufläche Dichteunterschiede bestehen, kann nur bei entsprechender Festigkeit des Materials beständig sein.

Eine Bestätigung der Anschauungen von AIRY fand man in den eustatischen Schollenbewegungen, in den Hebungen und Senkungen, die bei Entlastung oder Belastung einzelner Krustenteile sich zeigen. Alle diese Vorgänge lassen sich durch die Theorie eines Schwimmgleichgewichtes leicht erklären.

Beide Erklärungsversuche der isostatischen Kompensation führen aber zu großen Schwierigkeiten physikalischer Art, wenn man sie nicht rein statisch auffaßt, sondern berücksichtigt, daß es sich um ein dynamisches Gleichgewicht handelt, wenn auch geologische Vorgänge so langsam ablaufen, daß der gegenwärtige Zustand fast als etwas Beharrliches und Unveränderliches erscheint.

Es ist schwer verständlich, wie eine PRATTSche Massenordnung auf die Dauer im isostatischen Gleichgewicht bleiben soll. Über dem Kontinent werden durch das Spiel der exogenen Kräfte Massen abgetragen und nach dem Randmeer geschafft. Über dem Kontinent haben wir Massendefizit, im Bereich des Randmeeres, der Geosynklinale, eine im

Verhältnis zur kontinentalen Entlastung wesentlich größere Belastung, das isostatische Gleichgewicht ist dabei verloren gegangen. Ein Ausgleich kann nur durch Hebung und Senkung der einzelnen Massensäulen nach dem AIRYSchen Prinzip des Schwimmgleichgewichtes erfolgen. Doch werden jetzt nicht mehr die ganzen Massensäulen kompensiert, sondern nur mehr die *verhältnismäßig geringen Massenänderungen*. Deswegen wird aus der ursprünglichen PRATTschen Massenordnung im Lauf der Zeit durch AIRYSche Kompensation eine wieder isostatisch kompensierte Massenverteilung hervorgehen, bei der aber die Undulationen der unteren Grenzfläche zwischen Sial und Sima im Verhältnis zu einer nur nach AIRY kompensierten Anordnung sehr gering sind.

Für die AIRYSche Massenordnung beginnen die Denkschwierigkeiten an der unteren Grenzfläche zwischen Sial und Sima. Alle geologischen Bewegungen erfolgen auch bei einem „stürmischen“ Ablauf nach dem gewöhnlichen Zeitbegriff gemessen sehr langsam. Es wird daher trotz der beteiligten großen Massen kaum zulässig sein, solche Vorgänge als adiabatische Vorgänge zu behandeln. Es ist dann schwer verständlich, wie eine AIRYSche Massenordnung zustande kommen soll, bei der die Sialmassen in Tiefen versenkt werden müssen, in denen der Schmelzpunkt der sie aufbauenden Gesteine erreicht oder überschritten ist. Bei der Langsamkeit der Sinkbewegung wird dem Sial genug Wärme zugeführt, um es in der entsprechenden Tiefe aufzuschmelzen. Die dabei erlangte Mobilität würde im Verein mit der vorausgesetzten Mobilität des Sima, ohne die ein Einsinken gar nicht stattfinden könnte, zu einer Anordnung nach dem hydrostatischen, nicht aber dem isostatischen Gleichgewicht führen. Beim Überschreiten einer bestimmten Tiefe wird daher durch das Aufschmelzen die AIRYSche Massenordnung abgeschnitten und damit, wegen des einer Niveaufläche grob genäherten Verlaufes der unteren Trennfläche, einer PRATTschen Massenordnung angenähert. Die Grenze, durch die das AIRYSche Modell in der Tiefe begrenzt wird, ist jene isotherme Fläche, auf der der mittlere Schmelzpunkt des Sial erreicht wird.

Einfache Überlegungen zeigen also, daß praktisch weder eine AIRYSche, noch eine PRATTsche Massenordnung bestehen kann. Wohl können Ausgleichsbewegungen nach dem AIRYSchen Prinzip des Schwimmgleichgewichtes erfolgen, es kann aber dadurch niemals eine AIRYSche Massenordnung erzeugt werden, wenn das Sial dabei in Temperaturbereiche über seinen Schmelzpunkt versenkt wird. Eine PRATTsche Massenordnung kann aber nicht bestehen, weil sie durch die Tätigkeit der exogenen Kräfte gestört wird und wir tatsächlich die nicht unbedeutenden Vertikalbewegungen messen und aus den geologischen Befunden feststellen können, die das PRATTsche Modell zerstören müssen.

Die Schweremessungen zeigen aber, daß die isostatische Kompensation weitgehend erfüllt ist, die dazu notwendige Massenordnung muß aber zwischen einer AIRYSchen und PRATTschen gelegen sein. Dies ist für die rechnerische Behandlung ein ungünstiger Umstand, da die Massenkompensation bei variabler Dichte und variabler Tiefe der Grenz-

fläche in einer vieldeutigen Weise bewirkt werden kann. Wegen der unteren Begrenzung durch eine isotherme Fläche wird allerdings die Kruste sich mehr an das PRATTsche Modell hinsichtlich der konstanten Eintauchtiefe annähern; der dadurch nicht erfaßte Rest wäre durch Variation der Eintauchtiefe nach AIRY zu erklären, wobei sich die Undulationen der unteren Grenzfläche in entsprechenden Grenzen zu halten haben. Für die Erklärung der Kompensation darf es daher nicht heißen: AIRY oder PRATT, sondern nur: AIRY und PRATT.

Sicher ist, daß auch die AIRYSche Annahme gleicher mittlerer Dichte praktisch nicht zutrifft, sondern nur eine erste Näherung darstellt, die nicht angewendet werden darf, wenn es sich darum handelt, Einzelheiten der Kompensation rechnerisch zu untersuchen. Beispiele für das Bestehen großer Dichteunterschiede in der Horizontalen auch in größerem Bereich wären leicht zu geben. Aber auch in vertikaler Richtung werden schon im Bereich einer Säule Dichteunterschiede auftreten, die nicht immer vernachlässigt werden dürfen. Denn nicht die mittlere Dichte bestimmt den Anteil einer Massensäule am Schwerewert, sondern der wirkliche Dichteverlauf. Eine gleich schwere Massensäule erzeugt trotz der Massenkonzanz an ihrer oberen Begrenzung eine kleinere Schwereanomalie, wenn ihre Dichte von oben nach unten zunimmt als bei umgekehrtem Dichteverlauf. Aus der Schwereverteilung allein darf aber kein zwingender Schluß auf die Massenverteilung gezogen werden, weil die gleiche Schwereverteilung durch viele verschiedene Massenanordnungen erzeugt werden kann.

Das Absinken einer Massensäule bei sedimentärer Belastung erfolgt im Sinne AIRYS zur Herstellung des Schwimmgleichgewichtes, bis das untere Ende die Schmelzzone erreicht. Im aufgeschmolzenen Material kann aber Mischung mit dem Material des Substratums und damit der zur vollen Kompensation nötige Massenausgleich durch Dichtezunahme erfolgen. Überschreiten des Kompensationsgewichtes führt zu weiterem Absinken und Aufschmelzen der Sialsäule, Unterkompensation führt zur hydrostatischen Hebung, Aufhören des Abschmelzens und dem kompensatorischen Aufsteigen des dichteren Sima. Die überschüssigen Sialmassen werden nicht durch Verdrängen des dichteren Sima kompensiert, sondern durch Aufschmelzen beseitigt.

Die Tatsache, daß wir im Bereich der uns zugänglichen Gesteinshülle die Sedimente nur mit etwa 10% Anteil vertreten finden, deutet auf die bedeutende Rolle hin, die Aufschmelzvorgängen zukommt, die aber geschlossene zyklische Wanderungen der Gesteine zwischen Oberfläche und Tiefe zur Voraussetzung haben. Bei diesen Wanderungen ändert sich die stoffliche Zusammensetzung und der Zustand durch Austausch mit den Stoffen der Tiefe und durch Energiezufuhr aus dem in der Tiefe liegenden Reservoir.

Von besonderer Bedeutung ist die Energiezufuhr, die der Stoff der Kruste, das erstarrte, tote Gestein, aus dem lebendigen, energiegeladenen Stoff der Tiefe, dem Magma, erhält. Das Magma überträgt seine Energie entweder durch Wärmeabgabe und stoffliche Vermischung mit den in

die Tiefe versenkten Sedimenten, oder es wird in die höheren Niveaus der Kruste verdrängt und gehoben und kann von dort aus sich seinen Weg bis zur Oberfläche bahnen, oder allgemeiner ausgedrückt: erhebliche mechanische Arbeit gegen das Schwerfeld leisten. Je fester und dicker die Kruste ist, um so mehr werden die plutonischen Vorgänge, das Eindringen des Magmas in die unteren Stockwerke der Kruste, überwiegen.

Es ist wahrscheinlich, daß an den Orogenesen derartige Vorgänge in sehr erheblichem Ausmaß beteiligt sind. Bei geringer Widerstandsfähigkeit der Kruste überwiegt der Oberflächen-Vulkanismus und dabei wieder die Flächeneruption. Je widerstandsfähiger die Kruste wird, um so mehr überwiegt der Plutonismus und auch bei diesem wieder die lineare oder auf eine kleine Fläche beschränkte Tätigkeit des Magmas. Auch dieses kann dann nur mehr den vereinzelt Schwächezonen im Krustenbau folgen. Das Vordringen des Magmas in die Kruste wird in dieser mechanische Hebung, auf jeden Fall aber Änderungen der Struktur und damit der Dichte bewirken. Es kann im Sinne des PRATTSchen Modells Veränderungen der Dichte bewirken, die Rolle der Hefe in einem Teig spielen. Magmakratische Überlegungen erscheinen durchaus berechtigt, wenn auch sie keine Monopolstellung beanspruchen dürfen.

Nimmt man an, daß Perioden der Gebirgsbildung auch Perioden zunächst gesteigerter plutonischer, später auch vulkanischer Tätigkeit sind, dann sind sie mit einer übernormalen, überdurchschnittlichen Energieabgabe aus den obersten Bereichen des noch lebendigen Teils der Erde, den obersten Magmaschichten, verbunden. Gesteigerte Energieabgabe bewirkt stärkere Abkühlung und damit u. U. auch eine gesteigerte Kontraktion. Jedenfalls erscheint es aber am einfachsten zu sein, den Aufbau der Gebirge in der Hauptsache endogen, aus dem inneren Energievorrat der Erde zu erklären, da bis jetzt alle exogenen Erklärungsversuche viel zu kleine Wirkungen liefern.

Aus Untersuchungen der Schwereverteilung allein kann niemals ein sicherer Schluß auf die tatsächliche Massenanordnung der Kruste gezogen werden. Rechnungen haben gezeigt, daß sowohl die Annahme PRATTScher als auch AIRYScher Kompensation die vorhandenen Schwereanomalien gleich gut erklären könnte. Es bedarf anderer Überlegungen und Untersuchungen, um für oder gegen eine dieser Annahmen zu entscheiden.

Einen gewissen Einblick in die Struktur des Untergrundes geben die Methoden der Seismik, aber auch sie können nicht ganz hypothesenfrei angewendet werden, wenn es sich um die Untersuchung großer Tiefen handelt. Zwei Verfahren stehen auch hier zur Verfügung, Refraktions- und Reflexionsseismik.

Man kann zur Untersuchung des tiefen Untergrundes einmal die Fortpflanzung der elastischen Wellen bei natürlichen Beben heranziehen und untersuchen, ob die Laufzeiten jener Wellen, die durch eine mutmaßliche Gebirgswurzel laufen mußten, sich von denen anderer Wellen systematisch unterscheiden. Dieses Verfahren entspricht der Refraktionsseismik, verspricht aber nicht viel Erfolg. Einmal wird sich nur selten

ein hinlänglich starkes Beben ereignen, bei dem die Lage des Epizentrums für die Anwendung der Methode günstig ist, dann wird aber auch der auf die Gebirgswurzel entfallende Anteil des Wellenweges im Verhältnis zum Gesamtweg meist so klein, daß die gefundenen Effekte zweifelhaft sein und in die Fehlergrenzen dieser Methode fallen werden. Gerade bei Nahbeben machen sich die individuellen Eigenheiten des Krustenaufbaues in seinen obersten Teilen in der einzelnen Laufzeitkurve sehr stark fühlbar und es ist dann kaum zu entscheiden, in welches Stockwerk des Aufbaues eine kleine, tatsächlich festgestellte Abweichung wirklich zu verlegen ist. Nur eine hinreichend große und entlang eines Profils gut verteilte Zahl von Stationen kann bei der Refraktionsseismik ausreichende Sicherheit geben, aber gerade eine solche Stationsverteilung fehlt bei der Untersuchung der natürlichen Beben meistens.

Viel aussichtsreicher ist die Reflexionsbeobachtung. Mehrere Versuche aus der jüngsten Vergangenheit, wie z. B. die Beobachtung der Sprengungen im Schwarzwald und Schwäbischen Jura durch J. P. ROTHÉ [1] und H. REICH [2], haben gezeigt, daß auch aus sehr großer Tiefe Reflexionseinsätze bei Anwendung nicht allzu großer Sprengstoffmengen erhalten werden können. Die vorliegenden seismischen Sondierungen reichen bis etwa 30 km Tiefe. Es ist daher technisch durchaus möglich, auch ohne Anwendung außerordentlich starker Ladungen im Bereich des Zentralalpenkammes Reflexionsbeobachtungen auch aus noch größerer Tiefe zu erlangen. Es ist nur zu prüfen, was Reflexionsbeobachtungen wirklich geben können.

Die Reflexion elastischer Wellen tritt theoretisch an einer jeden Fläche auf, die zwei Medien verschiedener Schallhärte, gemessen durch die Phasengeschwindigkeit der betreffenden Wellenart, trennt. Der Energieanteil, der auf die reflektierte Welle entfällt, hängt von weiteren Bedingungen ab; er ist aber entscheidend dafür, ob im praktischen Fall eine Welle beobachtet werden kann. Ein großer Teil der möglichen Wellen erhält einen so geringen Energieanteil, daß sie nicht beobachtet werden können.

Die Grenzflächen lassen sich in zwei verschiedene Gruppen teilen. Eine Grenzfläche kann einmal zwei stofflich verschiedene Bereiche voneinander trennen, sie kann aber auch die Trennfläche zwischen zwei verschiedenen Zustandsgebieten eines und desselben, also stofflich homogenen Körpers sein.

Es ist kaum anzunehmen, daß bei stofflicher Verschiedenheit trotzdem die Schallhärte der beiden Bereiche gleich sein wird. Wir können daher annehmen, daß stoffliche Verschiedenheit auch immer zum Auftreten von Reflexionen führen kann. Aber auch in einem stofflich homogenen Medium kann an einer Zustandsgrenze, etwa zwischen kristallinem Bereich und dem darunter liegenden geschmolzenen Stoff, die Möglichkeit zum Auftreten von Reflexionen vorhanden sein, weil sich beim Zustandswechsel die elastischen Konstanten (z. B. hier die Formfestigkeit) erheblich, die Dichte aber nur sehr wenig ändern werden.

Durch Reflexionen werden wohl Schichtgrenzen erhalten, aber auch hier ist zunächst ihre Deutung als stoffliche Trennfläche nicht sicher. Bei Annahme eines Krustenmodells, wie es hier aus einer Synthese AIRYScher und PRATTscher Vorstellungen aufgebaut wurde, hat man in einer bestimmten Tiefe auf jeden Fall eine Diskontinuitätsfläche zu erwarten: nämlich dort, wo die Schmelzisotherme verläuft. Ob diese Fläche aber auch gleichzeitig eine Trennfläche zwischen Sial und Sima ist, kann durch Reflexionen allein nicht mit Sicherheit ermittelt werden. Auch die Reflexionsseismik gibt bei der Untersuchung der tieferen Schichten des Krustenaufbaues keine eindeutigen Ergebnisse.

Literatur.

1. ROTHÉ, J. P. et E. PETERSCHMITT: Etude séismique des explosions d'Haslach. Ann. Inst. Phys. Globe, Univ. Strasbourg, N. Sér. 5, Part 3, 13 (1950)
2. REICH, H.: Über reflexionsseismische Beobachtungen der PRAKLA aus großen Tiefen . . . Bulletin d'Information de l'UGGI, 2e année, No. 2, 1953, p. 229—232.