GEWICHT UND „WURZEL" DER GEBIRGE*)

VON

M. LUCIUS

DIE SCHWERKRAFT.

Kaffee in einer Tasse, Wasser in einem Tümpel haben eine ebene Oberfläche. Hängen wir ein Senkblei an einer Schnur frei über einer Wasserfläche, so finden wir, daß die durch die Schnur gegebene Lotlinie genau senkrecht auf der Oberfläche der Flüssigkeit steht und daß die Lotlinie genau nach dem Zentrum der Erde zeigt. Beide, Lot und Flüssigkeit, gehorchen dem Gesetz der Schwere und nähern sich dem Erdzentrum so nahe wie nur möglich: die Flüssigkeit, indem sie sich horizontal abplattet; das Lot, indem es sich dem Erdmittelpunkt so weit nähert, als die Schnur es erlaubt. Es ist ersichtlich, daß die Erde jedes Teilchen der Materie anzieht.

Die Schwerkraft, welcher alle Körper auf der Erde unterliegen, ist ein Einzelfall des allgemeinen Gesetzes der Anziehung, welches zuerst von Isaak Newton (1643-1727) formuliert wurde und dessen Verallgemeinerung bekanntlich lautet:

Jede Masse im Universum zieht jede andere Masse an mit einer Kraft, welche *direkt proportional dem Produkt* beider Massen und *umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung* zwischen denselben ist.

Oder in einer Formel ausgedrückt: $F = \frac{m' \times m''}{D^2}$, wobei F = Anziehungskraft, m' die eine, m'' die andere Masse, D die Entfernung zwischen beiden Körpern bedeutet.

*) Vortrag gehalten in der geologischen Sektion der S. N. L. am 1. April 1957. Die Anregung zu diesem Vortrag verdanke ich der Lektüre einer amerikanischen Neuerscheinung « Principles of Geology » von J. Gilluly, A. Waters A. O. Woodford, illustriert von R. Compton, Verlag von H. Freeman, San Francisco. — Die Eigenart der Darbietung des Stoffes und der Illustrationen veranlaßte mich, das vorliegende Thema in Anlehnung an dieses Buch in allgemein verständlicher Form zu behandeln. — Die hier beigegebenen Figuren 1, 3, 4, 5 sind ebenfalls genanntem Werke entlehnt.

Geben wir ein einfaches Beispiel: Die Anziehungskraft der Erde auf ein Lotblei im Meeresniveau sei am Äquator genau 1000 gr (Distanz 6377 km). Wenn wir diese Distanz verdoppeln, so beträgt das Gewicht des Lotes nach der gegebenen Formel nur mehr 1000 : 4 = 250 gr.

Die Oberfläche des Wassers in einem Weiher erscheint uns als vollkommen waagerechte Fläche. Wir wissen aber, daß jede größere Wasserfläche keine horizontale, sondern eine gebogene Fläche darstellt. Das erweist sich aus der einfachen Beobachtung z. B. auf dem Meere, leitet sich aber auch theoretisch daraus ab, daß jede Niveaufläche eine solche Fläche darstellt, welche in jedem Punkte genau senkrecht zu der Richtung des Lotes an dem gegebenen Punkte ist. Die Lotlinie steht aber überall *vertikal* auf dem *Erdmittelpunkt.*

Die Lotlinie definiert den Zenith, d. h. den Punkt am Himmel, direkt vertikal über dem Kopf des Beobachters, und läßt sich bis in den Erdmittelpunkt verlängern.

BESTIMMUNG DER KRÜMMUNG DER ERDOBERFLÄCHE DURCH DIE METHODE DER WINKELMESSUNG.

Das Lot selbst ist eines der ältesten und nützlichsten Instrumente der menschlichen Zivilisation. Bereits die alten Ägypter benutzten es, um nach Überflutung des Niltales die Feldgrenzen wieder genau festzulegen. Ebenso gebrauchen wir es noch heute, wenn auch in komplizierterer und vervollkommneter Form, bei allen Landvermessungen und Nivellierarbeiten.

Der erste Versuch, mit Hilfe des Lotes die Krümmung der Erdoberfläche und demnach die Ausmaße der Erde als Kugel zu bestimmen, wurde, nach unserm heutigen Wissen, von dem griechischen Geometer und Astronomen Eratosthenes in Ägypten ausgeführt. Hier das Prinzip des Verfahrens:

Eratosthenes hatte erfahren, daß in Syene, dem heutigen Assuan, im südlichen Ägypten, ein Brunnen bestand, in welchem ein Sonnenstrahl nur am Mittag des längsten Tages des Jahres vertikal auf die Wasseroberfläche fiel.

An dem gleichen Zeitpunkt bestimmte Eratosthenes den Winkel zwischen der Lotlinie und einem Sonnenstrahl, der in Alexandrien, 5000 Stadien = 900 km nördlicher als Syene, den

Rand in einem Brunnen streifte und dann die Wasseroberfläche traf. (Fig. 1.)

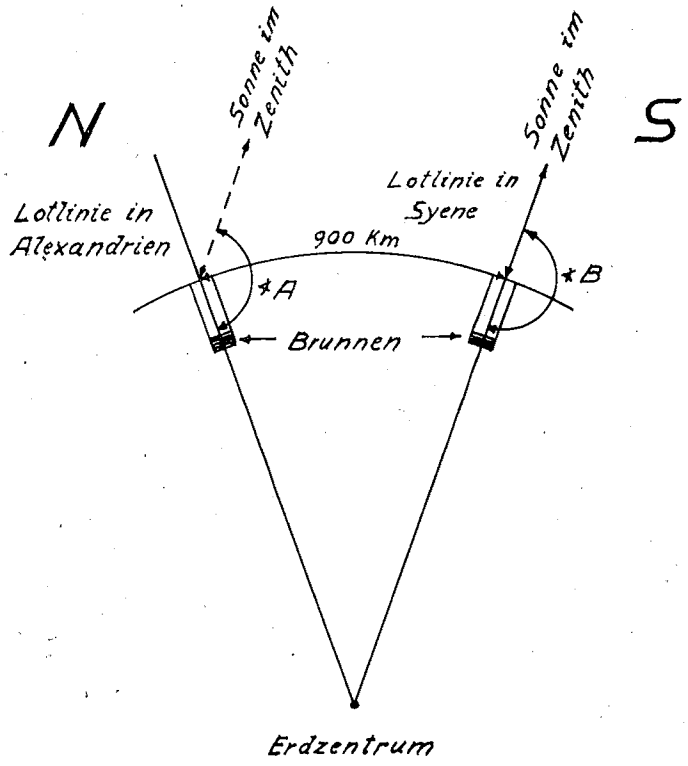


Fig. 1.

Schema der Methode des Eratosthenes zur Bestimmung des Umfanges der Erde.

Fügen wir gleich hier ein, daß Alexandrien und Syene nicht auf dem gleichen Meridian liegen, daß also die Entfernung von 5000 Stadien für die Bestimmung des Winkels der Krümmung zwischen beiden Orten zu groß angenommen war.

Unter der Voraussetzung:

a) daß die Entfernung der Sonne zur Erde so groß ist, daß die Sonnenstrahlen in Syene und Alexandrien praktisch parallel verlaufen,

b) daß Alexandrien genau nördlich von Syene liegt, so daß die Ebene, welche durch Alexandrien, Syene und das Erdzentrum gelegt wird, auch die Mittagssonne einschließt,

c) daß die Lotlinie senkrecht zum Erdzentrum steht,

d) daß die Erde eine Kugel ist,

ist der Winkel in Alexandrien zwischen der Lotlinie und dem in den Brunnen einfallenden Sonnenstrahl gleich dem Krümmungswinkel der Erdoberfläche zwischen Alexandrien und Syene.

Unter dieser Annahme wäre der Erdumfang durch folgende Gleichung gegeben:

$$\text{Umfang} = \frac{360 \times 5000 \text{ Stadien}}{\text{Winkel B-A}}$$

Es ergibt sich aus der Figur 1, daß die Differenz zwischen A und B gleich ist dem Winkel zwischen Lot und Sonnenstrahl in Alexandrien an dem Tage, an welchem in Syene Lotlinie und Sonnenstrahl zusammenfallen.

Weil nicht alle unter a-d gebenen Bedingungen zutreffen, konnte des Eratosthenes' Resultat nicht ganz genau sein. Die Rechnung weicht aber, durch kompensatorische Irrtümer begünstigt, nur um 11 % von dem heute errechneten Umfang ab. Es ist um diesen Betrag zu groß.

Ein Jahrhundert später wandte der griechische Philosoph Posidonius die gleiche Methode auf einem andern Erdmeridian an, war aber nicht so begünstigt durch kompensatorische Irrtümer wie sein Vorgänger. Der Umfang der Erde war nach diesen Ergebnissen um ein Viertel zu klein, was dann auch später Columbus zu dem Irrtum verleitete, daß er Amerika für Indien hielt.

Mit der Entwicklung der Schiffahrt im 17. und 18. Jahrhundert wurde das Bedürfnis nach genauerer Vermessung der Festlandsgrenzen immer dringender, so daß die Methode des Eratosthenes in immer weiteren Gebrauch kam. Bogenstücke eines Meridians von der Länge eines Grades oder Bruchteil eines Grades der geographischen Breite wurden an verschiedenen Orten in verschiedener Entfernung vom Äquator ausgeführt. Dabei zeigte sich, daß ein Breitegrad nach den Polen hin länger ist als am Äquator. Bei der Annahme, daß die Erde eine Kugel sei, müßte also die Kugel einen größeren Radius an den Polen als am Äquator haben. Das ist aber bei einer vollkommenen Kugelform nicht möglich. Der Widerspruch läßt sich nur lösen bei der Annahme, daß die Erde ein abgeplattetes Ellipsoid

darstelle, eine Figur, wie sie zustande kommt, wenn wir eine Ellipse sich um ihre kürzere Achse drehen lassen. Die heute international angenommenen Werte sind: Radius am Äquator 6.378.388 m; Radius an den Polen 6.356.912 m, Differenz 21.476 m.

Bei der Bestimmung der Form der Erde braucht keine Rücksicht auf das Relief der Oberfläche genommen zu werden. Der höchste Berg der Erde, der Mount Everest, hat beispielsweise auf einem Globus von 6 m Durchmesser nur eine Höhe von etwa 4 mm.

SCHWERKRAFTMESSUNGEN.

Es gibt aber auch eine andere Methode, welche darin besteht, daß man sorgfältige *Messungen der Schwerkraft* an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche macht, um interessante Angaben über die Masse und Form der Erde zu erhalten.

Eine erste Methode ist die des *Wägens einer Masse.*

Wenn wir die Schwerkraft bestimmen, bestimmen wir in Wirklichkeit das *Gewicht* einer Masse. Denn das Gewicht ist die Resultante der Wirkung der Schwerkraft auf einen Körper.

Zum Abwägen einer Masse gibt es aber zwei Instrumente: die Balkenwaage und die Federwaage.

Bei der Balkenwaage bringen wir eine Masse ins Gleichgewicht mit Einheiten eines Standardgewichtes, z. B. das Kilogramm. Bei der Federwaage wird die Streckung der Feder durch den Zug der Erdmasse auf die Einheit eines Standardgewichtes, z. B. 1 kg, bestimmt. Am gleichen Standort zeigen Balkenwaage und Federwaage genau 1 kg an. Dies sei, etwa in Mitteleuropa, im Meeresniveau.

Begeben wir uns jetzt mit unsern beiden Waagen in eine andere Höhenlage, etwa auf einen 3000 m hohen Alpenpaß. Wir bemerken jetzt, daß auf unserer Federwaage die Masse von 1 kg die Feder nicht genau bis zum am Meeresniveau gegebenen Strich streckt, sondern etwas darüber bleibt. Auf der Balkenwaage aber wird auch hier die Masse wieder genau das Standardkilogramm auswiegen. Alles ist hier das Gleiche geblieben, wie am Meeresniveau; nur die Distanz bis zum Erdmittelpunkt hat sich um 3000 m vermehrt. Dies wirkt sich aber gleicher Weise auf die Masse wie auf das entsprechende Standardkilogramm aus.

Nach dem Newton'schen Gesetz muß eine Änderung von D (Entfernung vom Erdmittelpunkt) eine Änderung in der Schwerkraft hervorrufen. Da aber die Schwerkraft eines Körpers sich als dessen Gewicht äußert, ist das Gewicht eines Körpers abhängig von der Höhe. So können wir feststellen, daß die Änderung für 3000 m zirka 1 promille beträgt, d. h. unser Körper wird hier an der Federwaage um 1 g leichter erscheinen.

Zu der Schwerkraft kommt noch die Einwirkung der *Rotation der Erde.*

Weil die Erde sich um ihre Polachse oder Rotationsachse dreht, ist die Zentrifugalkraft an den Polen gleich Null und erreicht ihr Maximum an dem Äquator, denn die Zentrifugalkraft ist proportional der Entfernung eines Punktes der Erdoberfläche zur Rotationsachse und steht senkrecht zu dieser. (Fig. 2.)

Die Zentrifugalkraft ist äußerst gering, sonst würden die Gegenstände ja von der Erde weggeschleudert werden, aber sie hat doch eine Bedeutung für die Form der Erde. Sie hat am Äquator eine Aufwölbung der Erde, an den Polen dagegen eine Abplattung hervorgerufen. Wegen dieser Abplattung ist die Schwerkraft größer an den Polen als am Äquator (zirka 0,5 $^0/_{00}$). Selbst wenn die Erde eine vollkommene Kugel wäre, bestände ein leichter Unterschied, weil an den Polen die Zentrifugalkraft unwirksam ist.

Endlich muß, nach dem Newton'schen Gesetz, die *lokale Dichte* des Gesteines eine Änderung der Schwere eines bestimmten Objektes zur Folge haben.

Stellen wir uns vor, daß wir mit unserer Federwaage eine Masse über einem gewaltigen Basaltstock (spez. Gewicht 3,2) oder einer ausgedehnten Höhle wägen.

Nach der gegebenen Formel muß die Federwaage über der Basaltmasse bei gleicher Belastung schärfer gespannt sein als über einem ausgedehnten Hohlraum.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß 1) die Höhenlage, 2) die geographische Breite, 3) die Dichte des unmittelbar unterliegenden Gesteines die Schwerkraft beeinflussen. Aber jeder dieser Faktoren übt einen sehr geringen Einfluß aus, der nicht mit unserer Federwaage erfaßt werden könnte. Dazu

brauchen wir ein viel empfindlicheres Instrument. Dieses besitzen wir in dem *Schwerependel.*

Das freischwingende Pendel, also ein solches, das nicht von einem Uhrwerk in dauernder Bewegung gehalten wird, bewegt

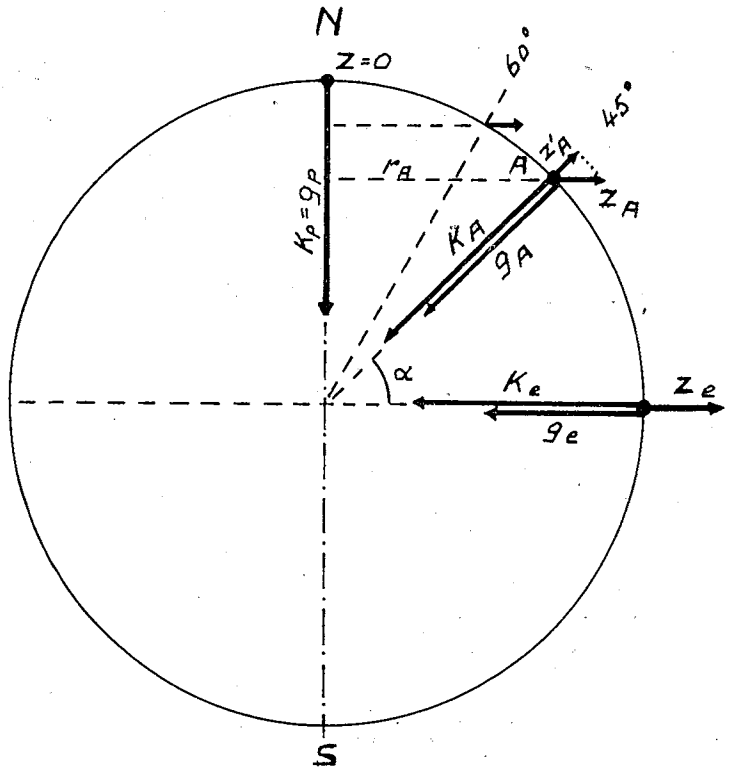


Fig. 2.

Diagramm der Abnahme der Zentrifugalkraft vom Äquator zu den Polen der Erde.

g = Erdbeschleunigung
K = Masssenanziehungskraft
γ = Gravitationskonstante
m = Masse
r = Abstand der Massen
v = Geschwindigkeit
Z = Zentrifugalkraft

$$K = \gamma \frac{M_1 \cdot M_2}{\eta^2}$$

$$Z = \frac{M \cdot V^2}{\eta}$$

$g^e = K^e - Z^e$ für den Äquator

g^p K^p $(Z = O)$ für den Pol

$g^A = K^A - Z^A \cdot \cos \alpha$ für eine Zwischenposition

Vom Äquator zum Pol hin (im Meeresniveau) nimmt g um 5,3 ‰ zu und zwar 1,9 ‰ wegen der Abplattung der Erde und 3,4 ‰ wegen der Zentriufgalkraft. g nimmt um 0,3 ‰ ab pro km Höhe im Luftraum.

sich *unter dem Einfluß der Schwere* hin und her. Es ist im Prinzip ein an einer dünnen Schnur aufgehängtes Senkblei oder Lot.

In der Ruhelage hängt das Pendel in der Verlängerung des Erdradius an diesem Punkte. Wir ziehen es aus dieser Ruhelage nach rechts und lassen es los. Es bewegt sich zurück bis zur Lage in der Verlängerung des Erdradius, wobei es dem Bogenstück folgt, das die Schnur der Pendelmasse erlaubt. Aber die Beharrungskraft, d. h. der Widerstand, den jeder Körper einer Änderung seiner Lage entgegensetzt, bringt das Pendel dazu, über den tiefsten Punkt des Schwingungsbogens hinaus, entgegen der Schwerkraft, nach links auf dem Bogen hinaufzusteigen, bis es so hoch kommt, daß die Beharrungskraft von der Schwerkraft überstiegen wird. Das Pendel fällt dann zum tiefsten Punkt zurück und steigt von hier wieder nach rechts bis zum Ausgangspunkt hinauf. Dieses Hin und Zurück ist eine *Schwingungsperiode.* Das Pendel schwingt jetzt hin und zurück, bis es, infolge des Widerstandes der Luft und der Reibung an dem Aufhängepunkt, zur Ruhe kommt. Est ist jetzt wieder zu einem Lot geworden.

Bringen wir noch einen Grundbegriff der Physik in Erinnerung. Wir wissen aus der täglichen Erfahrung, daß ein Körper, der nicht gestützt ist, der Schwerkraft folgt; er fällt. Die Geschwindigkeit des Fallens nimmt mit der Zeit zu. Sie ist also der Fallzeit proportional und zwar in jeder Sekunde um den Betrag des doppelten Fallraumes der ersten Sekunde. Man nennt diese Zunahme der Geschwindigkeit pro Sekunde die *Beschleunigung.*

Die Beschleunigung der Schwere wird durch g bezeichnet. Da die Beschleunigung g das Verhältnis einer Geschwindigkeit zu einer Zeit darstellt, wird die Einheit der Beschleunigung also erhalten, wenn man die Einheit der Geschwindigkeit, d. h. das Verhältnis der Länge- und Zeiteinheit $cm \cdot sec^{-1}$, durch die Zeiteinheit dividiert. Die Einheit der Beschleunigung wird daher für cm und sec bezeichnet durch $cm \cdot sec^{-1}/sec$ oder durch $cm \cdot sec^{-2}$. Eine Beschleunigung wird also ausgedrückt durch das Verhältnis einer Länge zum Quadrat einer Zeit. Eine solche Einheit wird als «Gal» bezeichnet oder anders ausgedrückt:

Das Gal ist die C. G. S.-Einheit der Beschleunigung. Das Tausendstel dieser Einheit ist das Milligal.

Für die Schwingungsperiode des Pendels gelten folgende Gesetze:

1. Die Schwingungsdauer t ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge L.
2. Die Schwingungsdauer ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung g der Schwere an dem gegebenen Orte, oder in einer Formel ausgedrückt: $t = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

Hieraus geht hervor, daß eine gute Pendeluhr, die in unserer Breite (50°) richtig geht, am Äquator nachgeht (in der Gleichung nimmt der Wert $\frac{L}{g}$ zu, weil g am Äquator abnimmt, was sich so auswirkt, als ob der Pendel länger geworden sei und ein längeres Pendel langsamer schwingt als ein kürzeres), am Pol aber vorgehen muß, weil hier g größer ist als am Äquator und folglich das Umgekehrte eintritt wie am Äquator. Oder auch eine Pendeluhr, welche in Paris richtig geht, muß in 5000 m Höhe (Mont Blanc) nachgehen, weil hier g kleiner ist als im Tale der Seine.

Unter *Schwingungszahl* eines Pendels versteht man die Zahl der in einer Sekunde erfolgten Schwingungen. Aus der oben gegebenen Formel läßt sich ableiten, daß die Beschleunigungen sich verhalten wie die Quadrate der Schwingungszahlen.

Ein Pendel, dessen Schwingungsdauer eine Sekunde beträgt, heißt *Sekundenpendel.* Bezeichnet man seine Länge mit L, so ergibt sich, vermöge obiger Formel, da jetzt $t = 1$ ist: $1 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ oder $1 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$ daraus $g = 4\ \pi^2\ L$.

Das heißt: Man findet die Beschleunigung der Schwere g, wenn man die Länge des Sekundenpendels mit dem Quadrat der Ludor'schen Zahl multipliziert. Da die Länge des Sekundenpendels sehr genau gemessen werden kann, läßt sich durch dieses Verfahren g genau ermitteln. Die Beobachtungen zeigen, daß die Beschleunigung der Schwere g vom Äquator nach den Polen hin zunimmt. Sie ist am Äquator 978, in Paris 980,95, in Berlin 981,23, am Pol 983,19 Einheiten (Gal).

Die genaue Bestimmung der Beschleunigung g interessiert besonders die Geodesie und die Geophysik, namentlich zur

genauen Bestimmung der Form der Erde und ihrer Unregelmäßigkeiten sowie zur Erforschung ihres tiefern und oberflächennäheren Aufbaues.

Moderne Schweremessungspendel werden so konstruiert, daß sie beinahe reibungslos sind. Sie hängen an einem feinen, messerscharfen, mit Diamant belegten Lager und bewegen sich in möglichst luftleerem Raume. Die Zahl der *Schwingungen* wird durch Präzisionschronometer bestimmt, welche Schwingungen von weniger als $^1/_{1000}$ Sekunden angeben. Mit solchen Feininstrumenten ist es möglich, die Schwerkraft mit einer Genauigkeit von einigen wenigen Tausendstel Gal oder Millionstel von g zu messen.

Auf Schiffen können Pendelmessungen wegen des Schaukelns nicht ausgeführt werden. Doch hat der holländische Geophysiker Vening-Meinesz eine Anpassung konstruiert, welche es erlaubt, das Pendel in Tiefseebooten, die tiefer als das Wirkungsgebiet der Wellen schwimmen, zu benutzen.

So wurden in den letzten Jahren viele Tausende von genauesten Messungen auf dem Lande und in dem Gebiete der Ozeane ausgeführt.

Auf diese Weise konnten als Ergebnis aus den Pendelmessungen sowie den Beobachtungen und dem Studium der Abweichung der Lotlinien von der Normalen an verschiedenen Punkten der Erde wichtige Folgerungen über die gegenseitigen Beziehungen zwischen Schwere, Topographie und Gesteinsdichte innerhalb der Erdkruste gemacht werden.

Eines der wichtigsten Ergebnisse war die Erklärung dessen, was bei der Bestimmung von Triangulierungspunkten an verschiedenen Orten der Erde scheinbar ein systematischer Irrtum zu sein schien.

Triangulation ist bekanntlich das Verfahren, durch Winkelmessungen einen dritten Punkt zu bestimmen, indem man von zwei Punkten ausgeht, deren Lage bekannt ist.

Ein solcher Punkt kann aber auch bestimmt werden, indem man, ohne Zuhilfenahme der Triangulation, seine geographische Länge und Breite *astronomisch bestimmt,* wie das auf Schiffen geschieht.

Astronomische Bestimmungen geschehen unter Bezugnahme zur Lotlinie und sind also im wesentlichen Bestimmungen des lokalen Zenithes.

Würde die Lotlinie stets nach dem Erdmittelpunkt zeigen, so müßten astronomische und trigonometrische Bestimmungen stets genau zusammenfallen, was aber nicht der Fall ist, weil die Lotlinie nicht immer direkt auf das Erdzentrum zeigt.

DIE ISOSTASIE.

Nach dem NEWTON'schen Gesetz wird das Senkblei von einer gegebenen Masse, welche 1 km entfernt ist, 100 mal stärker angezogen, als wenn die gleiche Masse 10 km entfernt ist. Das Lot muß demgemäß durch einen naheliegenden Berg stärker angezogen werden als durch einen gleich mächtigen, aber entfernteren.

Doch haben die mächtigsten Berge eine geringe Masse, verglichen mit der Gesamtmasse der Erde. Auch die dem Beobachtungspunkt ganz benachbarten Bergmassen lenken das Senkblei nur schwach ab. Um die theoretischen Ablenkungen nach dem Gravitationsgesetz an einem gegebenen Orte zu bestimmen, bedarf es einer bedeutenden mathematischen Arbeit, weil gewöhnlich die Wirkung so mancher unregelmäßiger Formen, die in verschiedener Richtung und Entfernung von dem Beobachtungspunkt liegen, zu berechnen ist.

Es hat sich bei diesen Messungen herausgestellt, daß die Bergmasse das Senkblei nicht um den Betrag ablenkt, der sich ergeben müßte, wenn die Berge wirklich eine Ladung von Steinen wären, welche auf der Erdkruste liegt, sondern daß dieselben auf irgend eine andere Weise gestüzt sind. Zur derselben Schlußfolgerung gelangt man durch Betrachtungen über die Messungen der Schwerkraft mit dem Schweremessungspendel.

Wäre der Berg nur eine der Erdkruste aufgelagerte Steinmasse, so müßte die Schwerkraft, nach Korrektur der Wirkung durch die hinzugekommene Höhe, größer auf dem Berge als in der angrenzenden Ebene sein und zwar wegen des durch die Bergmasse hinzugekommenen Betrags der Schwerkraft.

Die Ergebnisse vieler Untersuchungen mit dem Pendel zeigen aber, daß über weite Gebiete der Erde wenig Beziehung zwischen

Topographie und Schwerkraft besteht, wenn an dieser die nötigen Korrekturen für Höhenlage und Masse über oder unter dem Meeresniveau gemacht sind.

Aus diesen Beziehungen haben Geologen und Geophysiker geschlußfolgert, daß die hauptsächlichsten Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche nicht als der Erdkruste aufgelagerte Gesteinsmassen aufzufassen sind, sondern als Massen, welche durch einen *Flotationsprozeß auf einem schwereren, plastischen Erdinnern getragen werden,* wobei die aufragende Masse verschieden tief einsinkt, wie eine Planke aus Eichenholz tiefer im Wasser einsinkt als eine solche aus Tannenholz. Die erstere hat ein höheres spez. Gewicht und muß eine größere Wassermenge verdrängen, um ihr eigenes Gewicht zu ersetzen. Ebenso stellt man sich vor, daß die *überschüssige Masse* von Hochflächen, wie Gebirge und Kontinente, *ausgeglichen* ist durch ein geringeres spez. Gewicht des Materials, aus welchem ihre aufragende Masse und ihre Wurzel bestehen.

Man kann aber auch annehmen, daß die Planken, bei gleichem spez. Gewicht, verschiedene Volumina haben. Die dickere wird zwar tiefer einsinken, aber auch höher über dem Wasserniveau aufragen.

Gebirge und Kontinente erheben sich hoch wegen der geringeren Dichte ihres Gesteins. Ebenen und Meeresböden liegen tiefer, weil sie aus Gestein größerer Dichte bestehen oder daß, wenn das Gestein von gleicher Dichte ist wie bei den Gebirgen, das Gesteinsmaterial mächtiger ist unter dem Gebirge als unter der Ebene.

Diese Bedingungen eines *Flotationsgleichgewichtes* zwischen *Blöcken der Erdkruste wird als Isostasie bezeichnet.*

Es bezeichnet aber auch die *Tendenz* der Blöcke der Erdkruste, sich der Gleichgewichtslage benachbarter Blöcke zu nähern. Es bedeutet also die *Tendenz schwerer Blöcke, zu sinken, leichter Blöcke, zu steigen,* und zwar in der innern plastischen Masse der Erde.

Der Isostasiebegriff ist ein wichtiger Begirff, der heute in der Geologie immer wieder angewandt wird.

Die Isostasie ist eine physikalische Realität; nur gehen die Meinungen auseinander, wie dieselbe in der Erdkruste zu Stande kommt.

Die Theorie beruht auf geodätischen Tatsachen, welche zuerst bei geodätischen Aufnahmen in Indien beobachtet und studiert wurden.

Zum leichteren Verständnis sei hier die geschichtliche Entwicklung des Begriffes der Isostasie in Kürze gegeben.

TRIGONOMETRISCHE VERMESSUNG IN INDIEN.

Gegen Mitte des 19. Jahrhunderts wurde in Indien unter Sir Georges Everest, zum Zwecke der Herstellung eines ausgedehnten Netzes trigonometrischer Meßpunkte, ein Vermessungsdienst eingerichtet. Die Punkte sollten als Basis zum Kartographieren dieses ausgedehnten Subkontinentes dienen.

Die relative Lage dieser Kontrollpunkte wurde durch sehr sorgfältig ausgeführte Triangulation bestimmt, welche sehr genaue Distanzen zwischen den einzelnen Stationen ergab. Eine Menge solcher Punkte waren so festgelegt und ihre geographische Länge und Breite dazu sorgfältig durch *astronomische Beobachtungen* bestimmt worden.

Ist die Länge und Breite eines Punktes in einem trigonometrischen Netz bekannt, so ist es eine relativ einfache Sache, Länge und Breite anderer Punkte des Netzes mit Bezug auf diesen bekannten zu berechnen.

Wir kennen den Betrag der Krümmung der Erde und daher die Distanz längs des Meridians eines Bogens von einem Grad.

Durch Triangulation kann die Distanz zwischen zwei Stationen mit einem hohen Grad von Genauigkeit bestimmt werden und ebenso die genaue Kompaßrichtung zwischen den Stationen. Es ist daher leicht, durch Triangulation gemessene Distanzen in Bogengrade zu übertragen und demnach geographische Länge und Breite eines jeden Punktes des Netzes zu berechnen.

Solche Berechnungen sind natürlich unabhängig von astronomischen Beobachtungen an der neuen Station. Aber wenn eine astronomische Beobachtung der Länge und Breite der neuen Station, unabhängig von den trigonometrisch berechneten, gemacht worden ist, kann sie als Kontrolle der Triangulation benutzt werden.

Bei der Vermessung in Indien wurde es nun bald ersichtlich, daß für manche Stationen Bestimmungen ihrer relativen

Lage, wie sie durch Triangulation gemacht waren, nicht mit den Bestimmungen nach der astronomischen Methode übereinstimmten.

Zuerst nahm man an, es hätten sich Fehler in die Triangulation eingeschlichen, aber bei der Kontrolle zeigten sich die Resultate der Triangulation als richtig. Auch waren verschiedene dieser scheinbaren Irrtümer zu groß, um durch Unachtsamkeit bei der Arbeit erklärt zu werden.

Zu den Stationen, die von dem Archidiakon Pratt, einem englischen Geistlichen, der sich für dergleichen Fragen sehr interessierte, untersucht wurden, gehörten auch die Stationen Kaliana und Kalianpur. Kaliana liegt in der Ebene des Obern Ganges am Fuße der Ketten des Himalaya. Kalianpur liegt um 5°23′ südlicher in der Ebene der indischen Halbinsel. (Fig. 3.)

Indem Pratt eine Erklärung für die scheinbaren Irrtümer zwischen den trigonometrischen Vermessungen dieser beiden Punkte gab, legte er auch die Grundlage für die Theorie der Isostasie fest.

Pratt erwartete in Kaliana eine beträchtliche Ablenkung der Lotlinie nach Norden gegen die Himalayamasse und nahm dementsprechend an, daß die Entfernung zwischen den beiden genannten Stationen, ausgedrückt in Graden der Krümmung der Erdoberfläche, sich nach den Resultaten der Triangulation größer erweisen müßte, als wenn dieselbe auf astronomischem Wege bestimmt würde. Diese Erwartung wurde bestätigt.

Hier die Differenz der geographischen Breite zwischen beiden Stationen, bestimmt nach den beiden Methoden:

a) trigonometrisch:	5°23′42,29″
b) astronomisch:	5°23′37,06″
c) Differenz:	5,23″ = 155 m

Der Unterschied von 5,23″ entspricht einer Entfernung von etwa 155 m (500 Fuß), was viel zuviel ist, um durch einen Vermessungsirrtum erklärt zu werden.

Pratt untersuchte nun, ob die Anziehung des Himalaya auf das Lot für diesen Unterschied verantwortlich sei. Obwohl damals genaue topographische Karten des Himalayagebirges noch fehlten, so war doch genug bekannt, daß Pratt die annähernde

Masse des Himalaya über Meeresniveau sowie die mittlere Distanz derselben nordwärts von jeder Station berechnen konnte.

Bei der Annahme, daß die Bergmasse eine zusätzliche Last auf eine andererweise gleichartigen Kruste sei, konnte er dann berechnen, um wieviel die Lotlinie von jeder Station nach

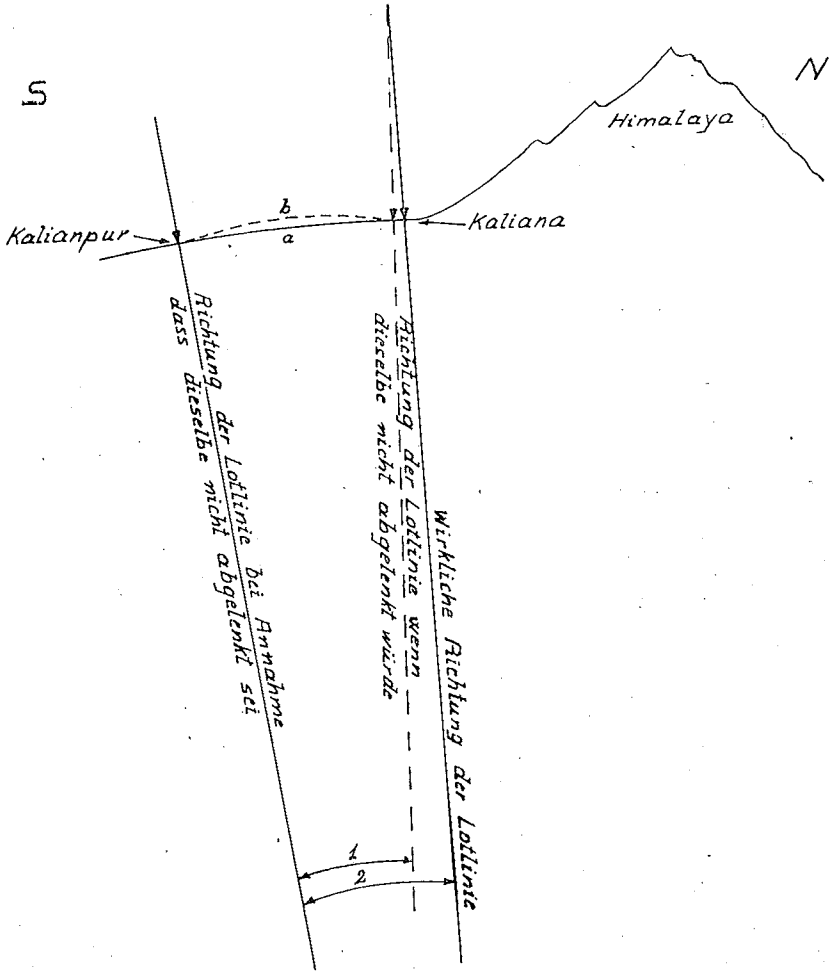


Fig. 3.

Der Einfluß der Masse des Himalaya auf die durch Trigonometrie bestimmte Entfernung zwischen Kalianpur und Kaliana.

a = Bogen der Erdkrümmung bestimmt durch Winkelmessung zwischen den Lotlinien.

b = Theoretischer Bogen der Erdkrümmung in diesen Breiten.

Der Unterschied zwischen a und b ist in unserm Schema sehr stark übertrieben.

Norden abgelenkt werden müsse, sowie auch die Differenz, die sich aus der Ablenkung gegenüber der astronomisch bestimmten durch die Bergmasse ergeben mußte. Er fand, daß bei dieser Annahme die Lotlinie in Kalania um 27,853″ und in Kilianpur um 11,968″ nach N abgelenkt sein sollte. Der Unterschied von 15,885″ war über dreimal größer als die Differenz von 5,23″, die in Wirklichkeit durch die trigonometrische Vermessung gefunden worden war.

PRATTS ERKLÄRUNGSVERSUCH (THEORIE DER ISOSTASIE).

Dieser Unterschied zwischen den von PRATT errechneten Resultaten und den wirklich gefundenen Werten war zu groß, um durch einen Irrtum in der Triangulierung oder durch einen Fehler in PRATTS Berechnung der Masse des Himalaya erklärt werden zu können.

PRATT erkannte bald, daß einige seiner Annahmen nicht den wirklichen Tatsachen entsprechen konnten.

Eine dieser Annahmen war, daß die *Dichte des Materials unter dem Meeresniveau die gleiche sei,* ob dieses Material unter der Ebene Indiens oder unter dem Gebirge des Himalaya liegt. Er hatte angenommen, daß die Masse des Gebirges von der höchsten Spitze bis zum Niveau des Meeres eine Geisteinsanhäufung sei, welche einer Kruste auflagerte, deren Dichte, unter dem Meeresniveau, gleichartig sei.

Er erkannte, daß der Widerspruch durch die Annahme erklärt werden konnte, daß das Gestein des Himalaya weniger dicht sei als dasjenige in der gleichen Tiefe in einem äquivalenten Gebiet in der Ebene Indiens.

PRATTS Annahme könnte auch folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Gebirge bilden zusätzliche Last auf der Kruste. Die Dichte der Kruste *ist gleich* unter dem *Gebirge* wie unter der *Ebene,* aber die Masse *über* der Kruste ist *weniger* dicht im Gebirge als in der Ebene.

Er nahm an, daß sowohl *der Himalaya* wie die Halbinsel Indiens auf einer tieferen Unterlage von *dichterem Material* schwimmen und daß die *Höhen,* zu welchen ihre Oberfläche sich über die Oberfläche dieser tieferen Unterlage erheben, *um-*

gekehrt proportional der mittleren Dichte des Materials sei, aus welchem beide Blöcke zusammengesetzt sind.

In andern Worten, die hochragende Masse des Himalaya wird kompensiert oder ins Gleichgewicht gebracht durch einen entsprechenden Mangel an Masse, welche sich unter dem Himalaya weit unter dem Meeresboden hinzieht.

Die PRATT'sche Auffassung kann veranschaulicht werden durch verschiedene Stäbe von verschiedenen Metallen, von denen jeder Stab das gleiche Gewicht und die gleiche Grundfläche hat und die in einem Quecksilberbad (13,6 g/cm^3) schwimmen. Die Metallstäbe haben verschiedene Längen, weil sie verschiedene Dichte haben und zwar ist die Länge im umgekehrten Verhältnis zur Dichte.

Da alle Stäbe das gleiche Gewicht haben, sinken sie gleich tief in das Quecksilberbad ein, weil alle Stäbe die gleiche Quecksilbermasse verdrängen müssen, um im Gleichgewicht zu sein. Da sie aber verschiedene Dichte haben, ist ihre Länge verschieden und sie ragen verschieden hoch aus dem Quecksilber heraus.

PRATT nahm an, daß Gebirge, Ebenen und Meeresböden wesentlich dieselben Beziehungen untereinander haben wie die verschiedenen Metallstäbe. Die Berge ragen höher hinauf aus dem flüssigen Substratum, weil sie aus weniger dichtem Material sind als dasjenige, das unter einer Ebene liegt.

PRATT Veranschaulichung war die erste Formulierung der « *Isostatischen Theorie* » und sein Schema einer « Kompensation » der Höhendifferenzen über dem Meeresspiegel durch Änderungen der Gesteinsdichte der Blöcke unter dem Meeresspiegel wird heute als « PRATTS *Theorie der Isostasie* » bezeichnet.

PRATT selbst gebrauchte das Wort Isostasie nicht. Dieses wurde erst einige dreißig Jahre später durch DUTTON geschaffen.

AIRYS THEORIE DER ISOSTASIE.

Der gleiche Band (1855) der « Transactions of the Royal Society », in welchem PRATTS Untersuchungen erschienen, enthält auch einen kurzen Beitrag zu der gleichen Frage von dem englischen Astronomen AIRY.

AIRY stimmte den meisten Schlußfolgerungen PRATTS zu und sagte, daß dieselben vorausgesetzt werden konnten, denn wenn

solche Massen wie große Ebenen und hohe Berge Anhäufungen auf einer starren Erdkruste seien, wäre kein Fels stark genug, um eine solche Last zu tragen. Die unterliegenden Gesteine müßten zerbrechen und seitlich auseinanderfließen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht sei. Die einzige Möglichkeit sei die, Gebirgskette als schwimmende Massen zu betrachten, wie PRATT es tut.

Im Gegensatz zu PRATT schlägt AIRY einen andern Mechanismus des Schwimmens vor.

Er findet keinen Grund zur Annahme, daß die Dichte des Materials unmittelbar unter einem Berge verschieden sei von derjenigen unmittelbar unter einer Ebene. Wenn beide Böden von *gleicher Dichte,* aber *ungleicher Dicke* seien, ließe sich der Unterschied in der Höhe der Oberfläche leicht erklären.

Der dicke Block (Bergmasse) wird zwar höher über die Oberfläche aufragen, aber er wird auch tiefer in die unterliegende schwere Masse einsinken. *Die Höhe der Bergmasse wird kompensiert durch eine «Wurzel»* von leichterem Material, die tiefer in das unterliegende «fluide»-Material hinunterragt und es verdrängt, genau wie ein Eisberg, der 50 Meter dick ist, höher aus dem Wasser herausragt als ein solcher, der nur 25 Meter dick ist, wobei er auch tiefer ins Wasser hinuntertaucht als letzterer.

AIRYS Ansicht wird bezeichnet als die *«Wurzel der Berge»-Theorie der Isostasie.* Sie gibt eine Erklärung der vermeintlichen Irrtümer der Indischen Vermessung ebenso gut wie die Theorie PRATTS. Sie stimmt dazu viel besser überein mit dem, was wir über die Zusammensetzung des Materials unter der Erdoberfläche wissen und schlußfolgern können und wird deshalb auch von Geologen derjenigen PRATTS weit vorgezogen.

BILDLICHE DARSTELLUNG DIESER THEORIE.

Wenden wir das gleiche Beispiel der bildlichen Darsttellung für die Theorie nach AIRY an, wie wir es für die Auffassung von PRATT getan haben.

AIRYS Theorie kann veranschaulicht werden, indem man Stücke eines Metalls von gleichem spezifischen Gewicht, aber verschiedener Grundfläche und Höhe, in Quecksilber taucht.

Sie reichen verschieden hoch auf und tauchen verschieden tief hinunter, weil sie von verschiedener Mächtigkeit sind.

Diese Bilder sind, verglichen mit der Erdkruste, große Vereinfachungen der Wirklichkeit. Die Erdkruste besteht natürlich nicht aus einfachen Blöcken, welche sich frei gegeneinander an reibungslosen Grenzflächen bewegen können. Ebenso ist das Substratum nicht flüssig, obwohl es bei langer Dauer auf eine schwere Last durch plastisches Fließen reagiert.

Als Schlußfolgerung ist nur hervorzuheben, daß beide, Pratt und Airy, zu dem Schlusse kamen, daß der Himalaya sich nicht zu der jetzigen Höhe erhebt, weil dessen hochragende Masse eine Ladung darstellt, welche von der Kraft der Erdkruste getragen wird, sondern weil sie, auf gewisse Weise, durch Schwimmen gestützt wird. Die allgemeine Gültigkeit dieser Idee findet eine starke Stütze in Beobachtungen mit dem Schweremessungspendel.

DIE THEORIE VON PRATT UND AIRY IM LICHTE DER HEUTIGEN AUFFASSUNG.

Die Auffassung Airys, daß das Gebirge unter der eigenen Last zermalmt würde, bedarf jedenfalls einer Einschränkung. Die Druckfestigkeit eines Gesteines, bestimmt an Gesteinswürfeln, die einem einseitigen Druck ausgesetzt werden, wird bedeutend erhöht, wenn der Gesteinskörper unter allseitigem, sog. hydrostatischem Druck steht.

Die Druckfestigkeit des Granites, bestimmt durch einseitigen Druck an Würfeln, liegt zwischen 1000 und 2000 kg/cm³. Nehmen wir als Mittelzahl 1500 kg/cm³. Das spezifische Gewicht ist 2,7. Eine Granitsäule von 1 cm² Grundfläche und 1 km Höhe wiegt also 270 kg. Dieser Granit könnte also eine Höhe von 5,5 km aushalten. Eine Höhe von 6 km würde bereits ein Gewicht von 1620 kg auf die Grundfläche ausüben, so daß diese zu Staub zerfallen müßte.

Laboratoriumsversuche an Solenhofener Schiefer, einem sehr feinkörnigen Kalkstein, haben bewiesen, daß die Druckfestigkeit dieses Gesteines unter hydrostatischem Druck sechsmal größer ist als unter einseitigem. Auf unser Beispiel, den Granit, angewandt, käme das einer Säule von $5{,}5 \times 6 = 33$ km gleich. Allseitig eingeschlossener Granit würde also erst bei einer solch

mächtigen Auflagerung zertrümmert werden, wobei natürlich von dem Einfluß der Temperaturerhöhung unter einer solch mächtigen Überdeckung abgesehen wird.

Airys Auffassung betont nur die Schlußfolgerung, daß eine starre Erdkruste, welche Druckfestigkeit das Gestein auch haben mag, nicht fest genug ist, um das Gewicht dieser Kruste zu tragen. Deshalb muß diese sich verhalten, als ob sie ihrem Wesen nach eine plastische Masse sei.

Es scheint zwar paradox, daß die Kruste zugleich fest und plastisch sei, denn einerseits sehen wir doch, wie das Relief der Kruste aus festem Fels besteht, anderseits die Kruste in isostatischem Gleichgewicht ist, d. h. große Blöcke der Erde sind in «schwimmendem Gleichgewicht» auf einem plastischen Kern. Dieses Schwimmen soll aber nicht Fließen bedeuten.

Die Schwierigkeit liegt eben darin, daß die Masse, in welche die auflagernde Last der Kruste einsinken muß, zugleich plastisch und sehr widerstandsfähig sein muß, ein Aggregatzustand, der mit unserer alltäglichen Erfahrung in Widerspruch steht, den wir aber logischerweise annehmen müssen, um die Vorgänge der Isostasie erklären zu können.

Die beiden Theorien von Airy und Pratt müssen nun dazu führen, daß eine Kompensation sich einstellt zwischen der topographischen Oberfläche und einer andern in der Tiefe gelegenen Fläche, unter welcher die gravimetrischen Anomalien kompensiert sind. Diese Fläche wird von Hayford in einer Tiefe von 120 km angenommen. Unter dieser Kompensationsfläche herrscht hydrostatisches Gleichgewicht. Was den Teil der Erdrinde über der Kompensationsfläche betrifft, so bestehen darüber zwei Auffassungen.

Für die Anhänger der Theorie Airys herrscht hier archimedisches Gleichgewicht. Die verschiedenen Krustenteile haben etwa gleiche Dichte und schwimmen auf einem Magma von höherer Dichte, in welches sie in Tiefen eintauchen, welche der Masse des betreffenden Rindenstückes proportional sind, die aber stets geringer sind als die Tiefe der Kompensationsfläche. Dieses schwere basische Magma wird als Sima (Silizium, Magnesium) bezeichnet, im Gegensatz zur äußern Kruste, welche Sial (Silizium, Aluminium) genannt wird. Für die Anhänger der Theorie Pratts, der auch Hayford angehört, haben die einzelnen

Rindenstücke verschiedene Dichten, die aber für jedes konstant bleiben. Sie steigen bis zur Kompensationsfläche hinab. Das mittlere Niveau der topographischen Oberfläche jedes Krustenkompartiments wäre demnach eine einfache Folgerung seiner entsprechenden Dichte, und auf diese Weise wäre den Bedingungen der Isostasie Genüge geleistet.

Überhaupt wäre hier zu bemerken, daß vom theoretischen Standpunkt der Berechnungen der gravimetrischen Anomalien die beiden Theorien von PRATT und AIRY gleichwertig sind, wenn letztere für den Geologen auch ansprechender ist als erstere. Beide sind höchstwahrscheinlich nur entfernte Annäherungen an die Wirklichkeit.

Ohne Zweifel herrscht gleichzeitig mit den beständigen Verformungen der Erdkruste die Tendenz einer Wiederherstellung des gestörten Gleichgewichtes im Sinne der Isostasie. Aber jedenfalls verbleiben auf lange Zeit hin elastische Spannungen und Reibungen zwischen den Krustenstücken. Außerdem dürften die Homogenität und die Permanenz, welche von der Theorie der Isostasie in den tiefern Regionen der Erde unter der sogenannten Kompensationsfläche angenommen werden, wenig wahrscheinlich sein. Diese tiefern Regionen sind wahrscheinlich der Sitz von mechanischen und chemischen Vorgängen, welche sich an der Oberfläche als Orogenese und Vulkanismus äußern.

DAS GEOID UND DAS SPHÄROID.

Wir haben gesehen, wie die genauen Messungen der Bogen eines Meridians in verschiedenen Breiten dazu zwangen, als Form der Erde, statt der Kugel des ERATOSTHENES, ein abgeplattetes Ellipsoid anzunehmen.

Aber die eben besprochenen Tatsachen zeigen, daß diese Erdform eines *abgeplatteten Ellipsoides nicht genügt, um allen Feinheiten gerecht zu werden.*

Obwohl benachbarte Berge die *Lotlinie nicht so sehr ablenken, als man erwarten müßte,* eine Tatsache, welche wir durch den Begriff der *Isostasie erklärt* haben, lenken die Berge nichtsdestoweniger die Lotlinie ab. So kann denn selbst die Meeresoberfläche kein abgeplattetes Ellipsoid sein, wenigstens nicht in Ufernähe, wo die See durch die Anziehungskraft der Ufer aufgerichtet ist. *Diese Oberfläche der See, welche natürlich*

an jedem Orte in einem rechten Winkel zu der Lotlinie steht, wird als Geoid bezeichnet.

Das Geoid kann demgemäß aufgefaßt werden: a) im Gebiete der Ozeane als die Oberfläche des Meeres und b) im Gebiete der Kontinente als die Oberfläche, bis zu welcher das Meer in einem System von schmalen Kanälen stehen würde, welche vom Meeresniveau ausgehend durch die Kontinente ziehen würden.

Das Geoid oder, in andern Worten, die Niveaufläche, welche der Meeresoberfläche, über die ganze Erde ausgedehnt, entspricht, ist natürlich keine regelmäßige mathematische Gestalt. Im Gegensatz zum Ellipsoid kann das Geoid nicht geformt werden, indem man eine Ellipse um ihre Achse dreht.

Daher bietet diese Form große mathematische Schwierigkeiten für den Geophysiker, welcher hauptsächlich mit dem genauen Vergleich von Messungen beschäftigt ist.

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, hat man eine theoretische Figur für die Erde aufgestellt, welche als *Sphäroid* bezeichnet wird. Das Sphäroid ist in Wirklichkeit eine « Weltmittelform » des Geoids.

Das Sphäroid liegt etwas über dem Geoid im Gebiete der Oberfläche der Ozeane und etwas unter dem Geoid in den kontinentalen Gebieten. (Figur 4.) Wenn wir bedenken, daß die Meere 71 % der Erdoberfläche einnehmen, so wird es klar, daß das Sphäroid als « welt-mittleres » Geoid nur sehr wenig vom Ellipsoid abweicht.

SCHWERKRAFTMESSUNGEN UND ISOSTASIE.

Zu jedem Punkte der theoretischen Figur der Erde, dem Sphäroid, gehört ein theoretischer Wert der Anziehungskraft, welcher nur von der geographischen Breite der Station abhängt. Das heißt, die Theorie nimmt die Zentrifugalkraft der Erde mit in Betracht.

Aus den Schwingungen des Pendels ist es möglich, die wirkliche Anziehungskraft zu messen. Es ist klar, daß, wenn die gemessene und die theoretische Anziehungskraft auf eine gemeinsame Basis gebracht werden sollen, verschiedene Korrekturen an den erhaltenen Angaben vorzunehmen sind. Diese

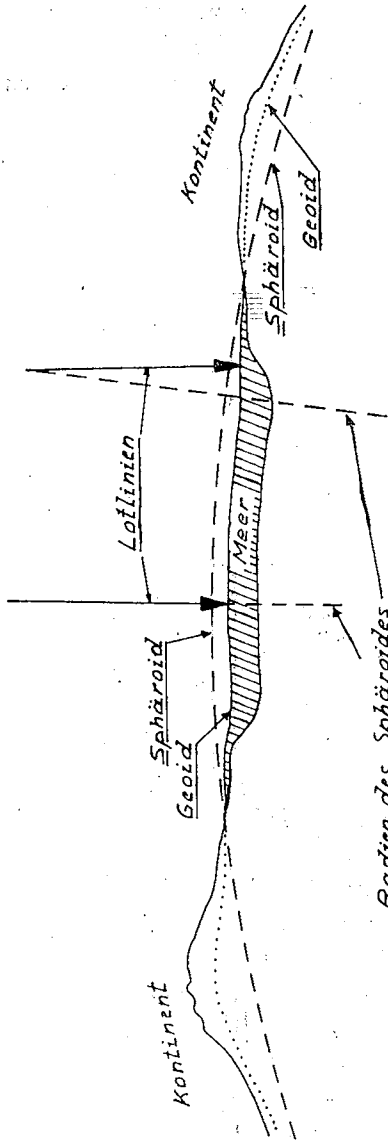


Fig. 4.
Das Verhältnis vom Sphäroid zum Geoid (äußerst stark übertrieben).

Korrekturen erfordern mancherlei komplizierte Berechnungen und Messungen.

Fast jede Station des Kontinentes liegt über dem Meeresniveau und daher *über dem Sphäroid.* Sie liegt deshalb weiter von dem Zentrum der Erdmasse weg als der theoretische Punkt des Sphäroids *unter ihr.* (Fig. 5.)

In einer ersten Annäherung zwecks Erlangen vergleichbarer Messungen muß also die Höhe der Station berücksichtigt werden. Die Korrektur der Höhenlage ist praktisch proportional der Höhe der Station, etwa ein Milligal pro 5 m. Es ist dies die *« Korrektur von* Faye ».

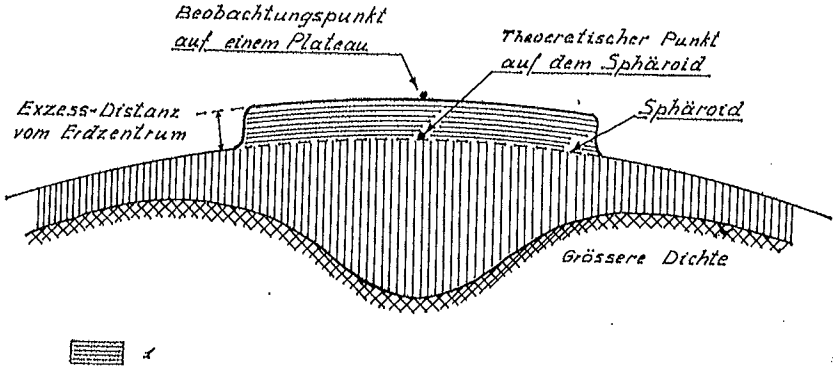


Fig. 5.

Schematische Darstellung der Faktoren, welche eine Korrektur der beobachteten Schweremessungen bedingen, um die nach der Bouguer'schen Methode berechneten theoretischen Werte untereinander vergleichen zu können.
1 = Exzeßmasse über dem Sphäroid.

Weiter ist dann die Gesteinsdichte zu berücksichtigen, welche zwischen der Station und dem Meeresniveau (Niveau des Sphäroids) liegt. Hierbei wird angenommen, daß die Station auf einem weiten Plateau liege (Bouguer*'sche Korrektur).* Auch die Bouguer'sche Korrektur ist proportional der Höhe der Station und wird angenommen zu 1 Milligal für je 10 m bei einer Dichte des Gesteines von 2,67.

Ferner kommt dazu die Korrektur des Reliefs. Das Relief der Erdoberfläche ist sehr wechselnd und mannigfaltig. Die *« Korrektur des Reliefs »* wird berechnet, indem man die mittlere Höhe einer Zone bestimmt, welche die Station kreisförmig umgibt und deren Diameter 160 km beträgt, weil infolge der Krümmung der Erdoberfläche in dieser Entfernung die vertikale Komponente der Anziehungskraft für das Relief der Station gleich Null ist.

Es ist klar, daß die Höhe der Station über dem Sphäroid, allein gemessen, den Wert *vermindert,* bei der Korrektur also addiert werden muß, während die Gesteinsdichte und die Ge-

steinsmasse (Relief) über dem Sphäroid den Wert *vermehrt,* bei der Korrektur also abgezogen werden muß, wenn man vergleichbare Werte zwischen der gemessenen und der theoretischen Schwerkraft erhalten will.

Die so korrigierten Werte entsprechen den Werten, welche man auf einer Erde erhalten würde, deren Berge abgetragen und deren Ozeanbecken ausgefüllt wären.

Vergleicht man nun die gefundenen korrigierten Werte mit den auf einem regelmäßigen Sphäroid berechneten, so erhält man Differenzen, welche als die «Bouguer'*schen Anomalien*» bezeichnet werden und welche benutzt werden, um die lokalen Wirkungen der Heterogenität des Untergrundes der Erdrinde aufzudecken.

Nach einer internationalen Übereinkunft wird der *theoretische Wert von dem gemessenen, korrigierten Wert abgezogen.*

Ist der theoretische Wert *kleiner* als der gemessene und korrigierte, hat man positive Schwereanomalie oder *positive* Bouguer'*sche Anomalie.* Ist er *größer,* so ist die Anomalie eine negative. Vergleicht man nun die Bouguer'schen Anomalien der Tausende von Landstationen und der Hunderte von Seestationen, so ergibt sich folgende wichtige Tatsache: Die Bouguer'schen Anomalien sind meistens *negativ* in den Kontinentalgebieten, meistens positiv in den Ozeanen. Um eine Idee der Größe der gemessenen Werte der Anomalien zu geben, sei hier eingeschaltet, daß in den Alpen negative Anomalien von —200 Milligal, auf den Hawaiinseln positive von +280 Milligal festgestellt wurden.

Es verhält sich also, als bestände unter den Bergen ein Defizit, unter den Ozeanen ein Überschuß im spezifischen Gewicht, wodurch der Überschuß an Masse der Berge gegenüber dem Defizit an Masse unter dem Meere ausgeglichen wird.

Es ist also, als ob die einzelnen Rindenstücke der Erdkruste das gleiche Gewicht hätten und so das Gleichgewicht der tiefern Schichten sicher gestellt würde, oder als ob die einzelnen Rindenstücke auf einem zähen Magma der Tiefe schwimmen würden.

Das sind eben die beiden Prinzipien, welche die Basis der Isostasie bilden. Das erste ist das Schema der Theorie Pratts,

das zweite der Theorie von Airy. Beide Erklärungen sichern theoretisch das notwendige interne Gleichgewicht des Erdkörpers.

Zu der gleichen Schlußfolgerung können wir auch durch ein etwas anderes Raisonnement kommen.

Die Korrekturen wurden ausgeführt für die Landmasse zwischen dem Sphäroid und der Landstation. (Figur 5.) Für diese Massen wurde der korrigierte Wert zu klein, weil zuviel abgezogen wurde.

Diese Korrektur wurde gemacht unter der Annahme, daß die Masse unter dem Sphäroid überall die gleiche Dichte habe.

Da im allgemeinen die Anomalien umso größer sind, je höher die Stationen liegen, hat einer von folgenden zwei Faktoren das Resultat beeinflußt:

1) Das Material *zwischen* der Station und dem Sphäroid ist nicht so dicht und hat daher nicht die Anziehungskraft, die wir angenommen haben,

2) oder das Material *unter* dem Sphäroid ist weniger dicht unter dem Hochland als unter dem Tiefland oder den Meeren.

ad 1) Das Material zwischen der Station und dem Seeniveau kann nicht weit von der mittleren Dichte des Gesteinsmaterials liegen. Die mittlere Dichte läßt sich zu 2,67 bestimmen.

ad 2) Es muß also der zweite Faktor sein, welcher die Anomalien hervorruft. Das ist aber gerade die Schlußfolgerung, welche aus den Beobachtungen der Pendelmessungen hervorgeht.

Die überschüssige Masse von Gestein über dem Meeresniveau wird kompensiert durch eine geringere Dichte des Gesteines *unter* dem Meeresniveau.

Umgekehrt, die positiven Anomalien bei Seestationen beweisen, daß die Auffassung, die Ozeane seien unterlagert von Material, welches von gleicher Dichte ist wie dasjenige unter den Kontinenten, eine irrtümliche ist.

Ersetzen wir diese Auffassung durch eine andere, nämlich die, daß die ozeanischen Segmente der Erde von einem *dichteren* Material sind als die Kontinente, dann sind die Anomalien für weite Regionen der Erde erklärt.

Also beides, nämlich die Ablenkung der Lotlinie wie die Beziehungen zwischen Schweremessungen und dem Relief der

Erde, zeigen das Gleiche an: Große Segmente der Erde sind, roh genommen, im schwimmenden Gleichgewicht oder in isostatischem Gleichgewicht miteinander.

Große Areale von Hochland erheben sich über weite Areale von Tiefland, weil entweder 1) erstere aus weniger dichtem Material zusammengesetzt sind als dasjenige unter dem Tiefland oder 2) wenn beide aus dem gleichen Material zusammengesetzt sind, dieses unter dem Hochland größere Mächtigkeit hat.

Aber für gewisse Areale von begrenztem Umfang ist das isostatische Gleichgewicht bei weitem nicht erreicht. Es gibt überzeugende Beweise, daß Gesteinsmassen vom Umfang von schmalen Gebirgsketten wirklich durch die Kraft der Erdkruste in höheren oder tieferen Lagen gehalten werden als ihre Gleichgewichtslage ist.

Über die maximale Größe einer solchen Masse, welche so aus ihrer Gleichgewichtslage herausgehalten wird, gehen einstweilen die Annahmen noch weit auseinander.

Aber es muß wirklich ein Maximum für diese Größe geben, denn Betrachtungen über Widerstand der Gesteine zwingen uns anzunehmen, daß die großen Erdblöcke, wie Kontinente und ozeanische Becken und sogar Blöcke von der Größe großer Gebirge, nicht im Stande sind, sich selbst zu tragen ,es sei denn, sie seien im gegenseitegen « schwimmenden » Gleichgewicht.

DIE OZEANISCHEN GRÄBEN UND DIE GÜRTEL DER NEGATIVEN ANOMALIEN.

Es besteht eine enge Verbindung zwischen den großen ozeanischen Gräben und den sie begleitenden Bogenketten von Inseln.

Die vielen Erdbeben in nächster Nähe dieser Tiefen weisen auf Unruhe der Kruste in diesen Gebieten hin. Ebenso ist es mit der vielfachen vulkanischen Tätigkeit dieser Gebiete.

Diese Tiefen stellen die maximalen Abweichungen der Erdoberfläche vom Meeresniveau dar. Manche derselben, die in unmittelbarer Nähe großer Inseln vorkommen, wie z. B. die Gräben bei Indonesien, den Philippinen (Mindanaotiefe), weiter bei Cuba und Porto-Rico, müssen verhältnismäßig jung sein, weil sie sonst mit Sedimenten von den Inseln her aufgefüllt wären.

Eine der wichtigsten Entdeckungen der letzten Dezennien ist die Feststellung ,daß diese Gräben oder die benachbarten Inseln bedeutende Abweichungen der Isostasie zeigen, wie durch den holländischen Geophysiker A. Vening-Meinesz zwischen 1923 und 1932 durch Beobachtungen in Unterseebooten nachgewiesen wurde.

Die auf der Karte von Indonesien, nach den Beobachtungen von A. Vening-Meinesz (1934), vermerkten Anomalien sind das Ergebnis von Messungen, an denen bestimmte Korrekturen vorgenommen wurden (Bouguer'sche Anomalien).

Diese Korrekturen umfassen: Berücksichtigung der Tiefe des Unterseebootes unter der Oberfläche, der Topographie des Landes und des Meeresbodens auf weite Entfernungen um die Station, weiter Berücksichtigung der Tatsache, daß das Meerwasser inbezug auf Dichte erheblich von dem Gestein unter der Station abweicht und endlich Berücksichtigung der Annahme, daß ein sehr großes Segment der Erdkruste, mit der Station als Mittelpunkt, als sich im isostatischen Gleichgewicht befindend, zu gelten hat (regionale Kompensation).

Das Gebiet negativer Anomalien in Indonesien bildet einen Gürtel von 4800 km Länge und 30 bis 160 km Breite, der so verläuft, daß seine Achse teilweise mit der Achse eines ozeanischen Grabens zusammenfällt, zum Teil auf der einen oder andern Seite dieses Grabens hinzieht. Andere Teile liegen auf einer submarinen Schwelle, welche den ozeanischen Graben durchschneidet. Auf den Inseln Timor, Tanimber, Kei und Cerom kommt diese Schwelle an die Oberfläche, aber der schmale Gürtel negativer Anomalien bleibt auch hier bestehen. Die Beschränkung von negativen Anomalien auf einem schmalen Streifen der Erdrinde kann nur bedeuten, daß dieser Streifen unterlagert wird von Gesteinen geringerer Dichte, als dies in den angrenzenden Gebieten der Fall ist.

Diese geringe Breite verlangt, um das Defizit in der Schwerkraft zu erklären, das Bestehen eines etwa 40-55 km tiefen schmalen Keils von leichterem Gestein als dasjenige der Umgegend des Gürtels.

Zu beiden Seiten des negativen Gürtels sind über ein breites, sichtlich nicht lineares Gebiet die Anomalien positiv.

Die positiven Anomalien werden angesehen als Zeichen, daß die schwereren, dichteren Gesteine in der Kruste hier näher an die Oberfläche kommen, als dies normalerweise der Fall ist, daher eine größere als normale Anziehungskraft ausüben.

Sowohl die zahlreichen Erdbeben wie die starke eruptive Tätigkeit deuten darauf hin, daß die Erdkruste längs des Inselbogens von Ostindien äußerst schwach ist, verglichen zum Beispiel mit der Kruste in den Schildgebieten von Skandinavien oder Kanada, die lange vor dem Palaeozoikum von krustalen Bewegungen oder eruptiver Tätigkeit unberührt blieben und daher als ungewöhnlich mächtig betrachtet werden können.

Vening-Meinesz hebt hervor, daß diese Tatsachen nur erklärlich sind bei der Annahme, *daß die Gesteine des negativen Gürtels dauernd niedergehalten werden,* so daß sie abgehalten werden *vom Auftrieb zu dem Niveau, das ihrer Dichte entspricht.* In andern Worten, eine selektive abwärts gerichtete Kraft von ungewöhnlichem Ausmaß ist hier wirksam.

Das Gestein in diesem Gürtel muß unter großem, scherendem Druck stehen, da dasselbe, entgegen seiner natürlichen Tendenz zum Auftrieb, in die Tiefe geschleppt wird. Es ist klar, daß solche Bedingungen Faltung und Überschiebung zu Stande bringen von dem Typus, wie wir sie mit Faltengebirgen in Verbindung bringen. In Übereinstimmung mit diesen Schlußfolgerungen ist zu bemerken, daß die Inseln längs dieses Gürtels aus stark umgearbeitetem Gestein bestehen und lokal eine Decke mit aufgetriebenen und aufgerichteten Korallenriffen tragen.

DIE WURZEL DER GEBIRGE.

Gebirge unterscheiden sich von Kontinentalsockeln durch folgende Züge:

1. Das Sial oder die Masse granitischer Tiefengesteine ist unter den Gebirgen weit mächtiger als unter den Kontinentalsockeln, eine Verallgemeinerung, welche durch Schweremessungen und seismische Daten gestützt wird.
2. Das Gestein der Gebirge ist stärker verformt als dasjenige der Kontinentalplatten.
3. Granitische Plutone bleiben auf Gebirge und auf Schildgebiete beschränkt.

4. Die Mächtigkeit der Sedimente ist größer in dem Gebirgsgürtel als in den Kontinentalsockeln.
5. Bei Faltengebirgen muß eine bedeutende Verkürzung in horizontaler Richtung des oberen Teiles der Kruste erfolgt sein.

Welches auch immer der Vorgang sei, der ein eng gefaltetes Gebirge hervorbringt, die Isostasie verlangt, nach Airys Hypothese, daß die Basis des gefalteten Sedimentkörpers in ein tieferes Niveau *einsinkt*. Die überschüssige Last eines regionalen Faltengebietes kann von der Kruste nicht getragen werden, ohne daß diese eingebogen wird.

Das Sial, das den äußeren Teil der Erdkruste bildet, hat ein spezifisches Gewicht von 2,7. Die genaue Dichte des unterliegenden Sima ist unbekannt, doch ist sie bestimmt größer als 2,7, sonst könnte keine Isostasie bestehen. Nach Schätzungen aus seismischen Daten nehmen wir hier eine Dichte von 3,3 an.

Wenn, durch horizontale Verkürzung eines Gürtels des oberen Teiles der Kruste, eine Verdickung von 1 km eintritt, so muß, um das isostatische Gleichgewicht herzustellen, die Basis des Gebirges tief genug in das Sima einsinken, um eine Simamasse zu verdrängen, welche gleich ist dem Gewicht der hinzugekommenen Sialmasse, das sind $\frac{2{,}7 \times 1000 \text{ m}}{3{,}3} =$ rund 800 m. Die Oberfläche würde also nur um 200 m erhöht werden. Diese Ziffern sind nicht wörtlich zu nehmen, weil die quantitativen Werte zu wenig bekannt sind. Aber sie stimmen mit zwei Tatsachen bei Faltengebirgen überein. Die *lange Dauer ihres Aufstieges* und die *Association* mit Granitplutonen sprechen für die allgemeine Gültigkeit genannter Ziffern.

Jedes Gestein, das nach dem Aufsteigen Anzeichen tiefen Vergrabens und Deformierung aufweist, ist metamorph umgewandelt. Diese Umwandlung verlangt erhöhte Temperatur, welche durch Niedersinken der Sedimente in den Geosynklinalen erlangt wird. Dazu enthalten die Gesteine radioaktive Elemente, welche die Temperatur noch steigern.

Wird ein größerer Block von sialischem Gestein erhitzt, so mag er sich genug ausdehnen, um die Oberfläche in beachtenswerter Weise aufzuwölben. Es wird natürlich bei dem lang-

samen Erhitzen lange dauern, bevor sich die Wirkung an der Oberfläche bemerkbar macht.

Sind die angehäuften Sedimente sehr tief begraben (bis zu 60 km), wie dies für die Wurzel unserer Kettengebirge angenmmeo wird, so ist die Ausbreitung der Hitze äußerst langsam und das niedergebogene Sial mag in engem Kontakt mit heißem Sima kommen.

Unter diesen Bedingungen mag das Sial nach und nach bis zu seinem Schmelzpunkt erhitzt werden und eine Masse von granitischem Magma bilden.

Der Reichtum an Migmatiten*) in tieferodierten Gebirgsketten wie auch die praktische Beschränkung der Granitplutone auf Faltengebirge weisen auf solches Aufschmelzen hin. Aber eine Wurzel, welche so tief reicht, daß teilweises Schmelzen derselben eingetreten ist, kann sich nicht länger als «Wurzel» erhalten; sie muß sich nach und nach seitwärts ausbreiten und sich ausflachen. Auf diese Weise wird das Sial längsseitig der Kette verdickt, was vielleicht die Ursache für das Bestehen der hohen Plateaus ist, welche manche Ketten wie die Rocky Mountains und den Himalaya begleiten.

Die Bewegungen der Erdkruste gehen äußerst langsam vor sich und nehmen viel Zeit (geologische Zeit) in Anspruch. So läßt sich erklären, daß die Erde auf große Räume und in der Hauptsache im isostatischen Gleichgewicht ist, trotz der gewaltigen Anhäufungen von Material (Gebirge) auf der einen Seite und der gewaltigen Abtragung anderseits.

Durch langsames, plastisches Fließen von aufbereitetem Material tendiert die Erde dazu, die isostatischen Störungen, welche durch die erwähnten Vorgänge geschaffen wurden, wieder auszugleichen.

Die Frage drängt sich auf, ob nicht in dem Gebiete von Indonesien, wo die größten gravimetrischen Anomalien gemessen wurden, die Segmente der Erdkruste, welche am weitesten vom isostatischen Gleichgewicht entfernt sind, eine Region darstellen, wo Falten noch im Aufsteigen begriffen sind und wo die geheimnisvolle, aber unwiderstehliche Kraft, welche Gebirge faltet und aufwölbt, jetzt aktiv tätig ist.

---

*) Migmatite sind metamorphe Gesteine, welche durch Eindringen von Magma in das umgebende Nebengestein entstehen, wobei sich Mischgesteine mit granitischem Charakter bilden.