

DER UNTERGRUND DER KONTINENTE UND OZEANE NACH GEOPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

LUDGER MINTROP

Die geophysikalischen Untersuchungen über den Untergrund der Kontinente und Ozeane begannen mit Schweremessungen. Sie zeigten zwei grosse Phänomene: Unter Gebirgen negative, auf den Meeren positive Bouguer-Anomalien. Erstere zeigen Massen-Defizite, letztere Massen-Überschüsse in der Erdkruste an. Im grossen und ganzen gesehen stellt der Verlauf der Kurve der Bouguer-Anomalien das Spiegelbild des Profiles der Oberfläche der festen Erdkruste dar, wie die unter Benutzung von Daten, die *Heiskanen* (1) und *Morelli* (2) veröffentlicht haben, entworfenen Profile in den Figuren 1 und 2 zeigen.

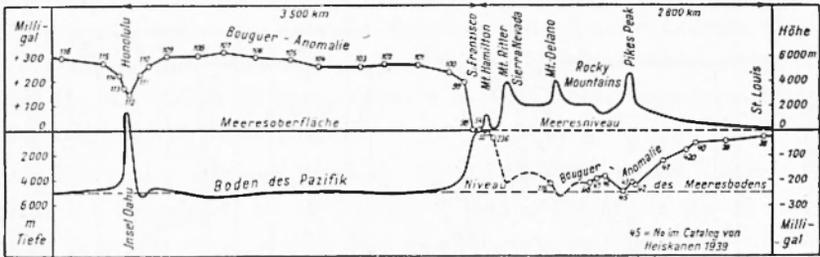


Fig. 1 - Bouguer-Schwere-Anomalien im Profil Rocky Mountains-Pazifik.

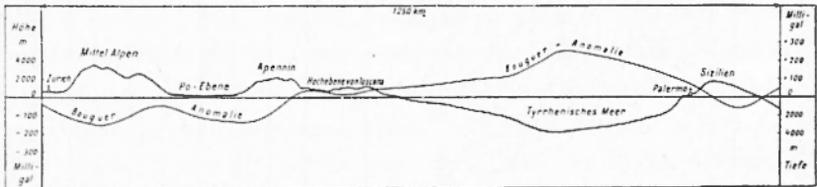


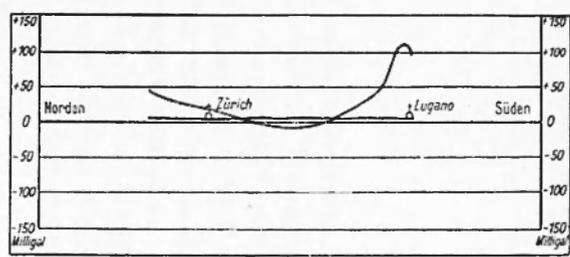
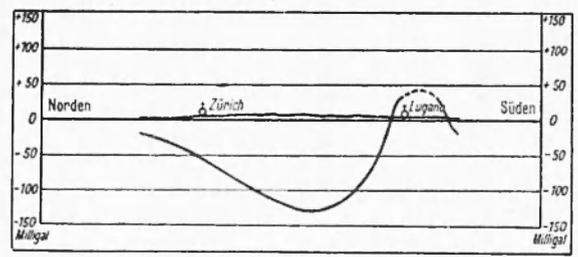
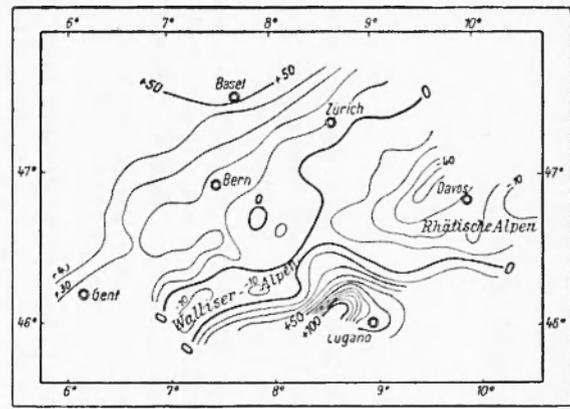
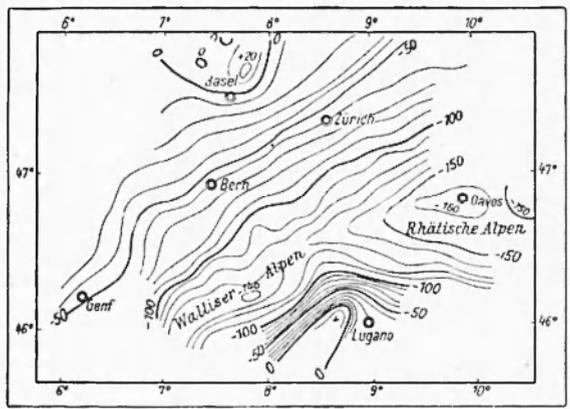
Fig. 2 - Bouguer-Schwere-Anomalien im Profil Alpen-Sizilien.

Wie die beiden Phänomene zu erklären sind, ist bis heute ein Mysterium geblieben, da der Vorgang des Lastenausgleiches in der Erde noch immer unbekannt ist. Zwar sind verschiedene Theorien darüber aufgestellt worden; der experimentelle Nachweis des « Sitzes » des Massen-Defizits oder des Massen-Überschusses ist aber bisher noch

Karte der Bouguer - Schwere - Anomalien

Karte der isostatischen Schwere - Anomalien.

nach Th. Niethammer(1921)



Profil der Bouguer-Schwere-Anomalien.

Profil der isostatischen Schwere-Anomalien.

Fig. 3 - Bouguer-und isostatische Schwere-Anomalien in den Schweizer Alpen nach Niethammer.

in keinem Falle gelungen. Zwei Hypothesen haben seit fast 100 Jahren im Vordergrund gestanden, die eine von *Pratt* (3), die andere von *Airy* (4). Ersterer nahm an, dass die Berge durch Expansion der Tiefenschichten nach oben getrieben worden seien und ihre Dichte entsprechend dieser Volumen-Vermehrung der Schichten geringer sei als ausserhalb des Gebirges. Nach *Airy* sollen die Berge im dichteren Substratum schwimmen, also von oben gekommen sein.

Für die Berechnung isostatischer Reduktionswerte in den Schweizer Alpen folgte *Niethammer* (5) der *Pratt'schen* Vorstellung mit der Modifizierung von *Hayford* (6), wonach unter dem Gebirge bis zu einer « Ausgleichstiefe » von 120 km eine gleichmässige Dichtedifferenz angenommen wurde. In der Figur 3 sind neben den Bouguer-Anomalien die isostatischen Schwere-Anomalien wiedergegeben. Wie insbesondere die Profile in der Figur zeigen, sind durch die isostatische Reduktion zwar die grossen negativen Bouguer-Anomalien in der Achse des Gebirgszuges fast ganz verschwunden, dafür treten aber nördlich der Alpen starke positive Anomalien auf, und am Südrande des Gebirges bereits vorhanden gewesene positive Anomalien werden erheblich verstärkt. Daraus ist ersichtlich, dass die den Berechnungen zu Grunde gelegte Vorstellung vom Massenausgleich der Wirklichkeit nicht entspricht. Das Dichte-Defizit ist offenbar mehr auf das Gebiet unter dem Kamm des Gebirges zu beschränken.

Mit einem solchen Ergebnis der Anwendung seiner Theorie hat *Pratt* (7) gerechnet, als er schrieb: « The existence of the mountain mass is a fact indisputable. Not so the compensating cause, which is simply conjectural as to its existence, and altogether uncertain as to its extent, if it exist. We have no certain and independent method of determining this, nor of ascertaining even if the hypothesis be valid how far down the attenuation extends or what law it follows ».

Salonen (8) folgte bei seiner isostatischen Reduktion der Schwere-messungen in den Schweizer Alpen nach dem Vorbild seines Lehrers *Heiskanen* (9) der Hypothese von *Airy*. Wie die Figur 4 zeigt, wird die untere Grenze der unbelasteten Erde versuchsweise nacheinander zu 10 bis 30 km angenommen und der Querschnitt der « Wurzel » des Gebirges so geformt, dass die graphische Darstellung der Summe der Ergebnisse der Einzelrechnungen sich der Kurve der Bouguer-Anomalien möglichst anschliesst. Trotz aller Freiheiten, der *Salonen* sich bei seinen Annahmen bedient, ist der Anschluss nur sehr unvollkommen gelungen.

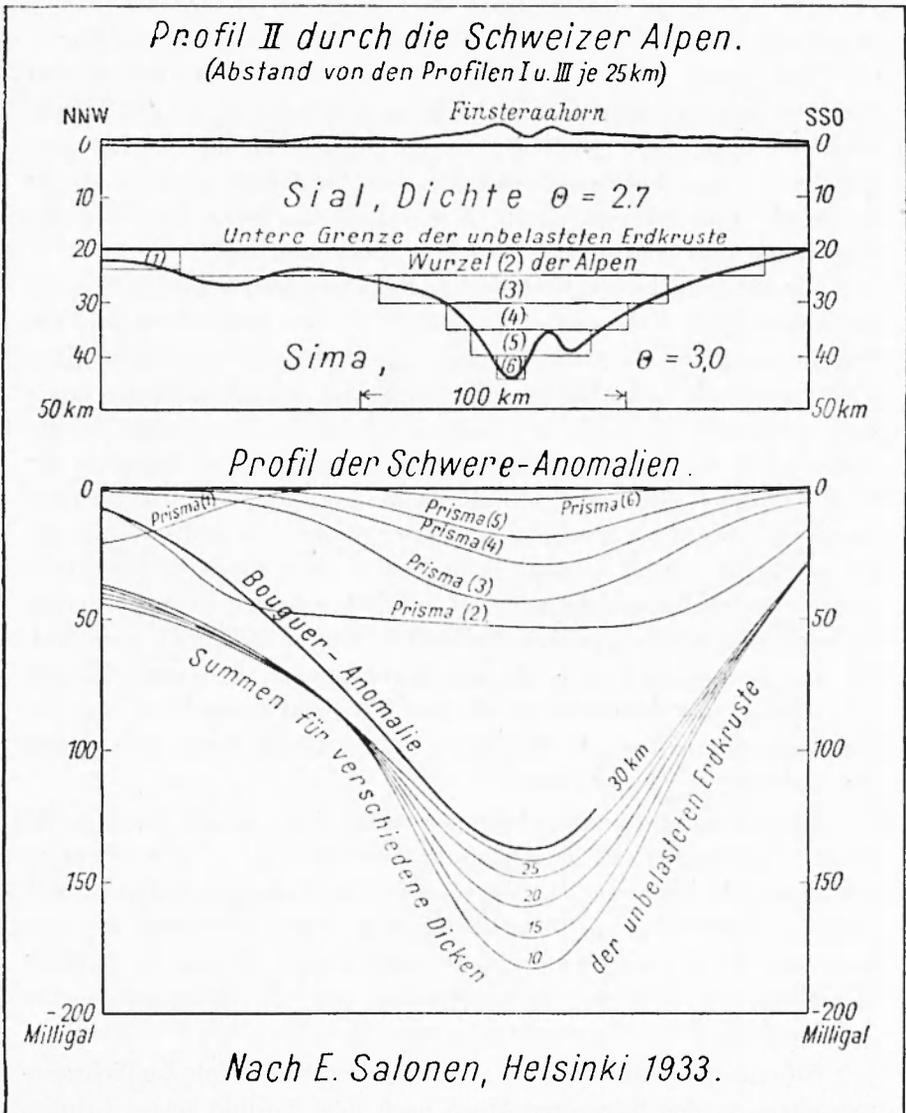


Fig. 4

Holopainen ⁽¹⁰⁾ hat versucht, die Wurzel der Zentral-Alpen zu ermitteln und ist dabei zu der im Profil der Figur 5 dargestellten Form gekommen. Die Eintauchtiefe ist die gleiche wie bei *Salonen*, obschon die Dichtedifferenz zwischen Sial und Sima doppelt so gross angenommen worden ist. Dieser Umstand allein hezeugt schon die Haltlosigkeit der Theorie von *Airy*. Letzterer hatte schon mit einer

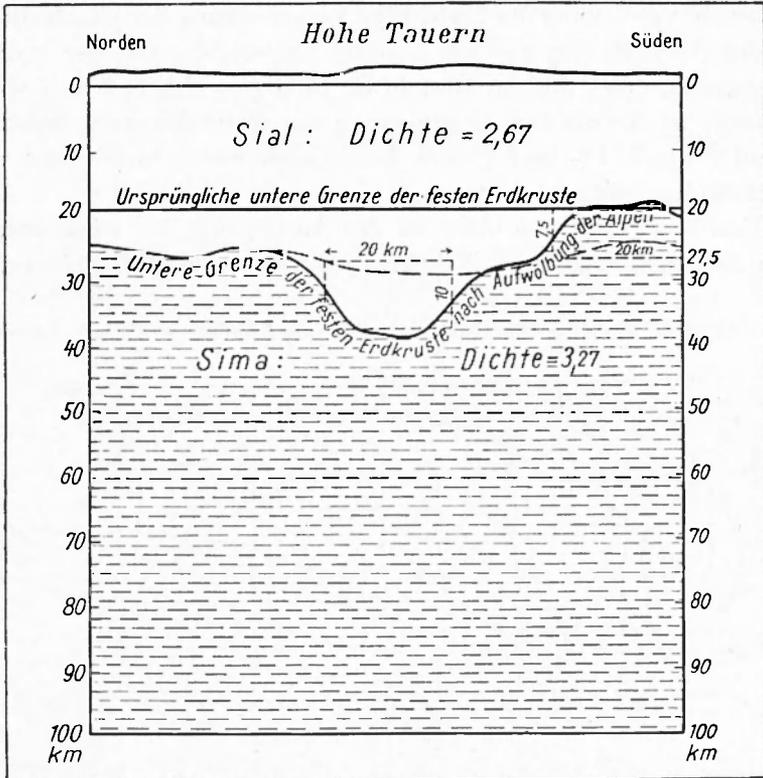


Fig. 5 - Profil durch die Zentral-Alpen nach Holopainen.

solchen Möglichkeit gerechnet, als er seine Ausführungen mit den Worten schloss: « In all the latter discussions it is supposed that the crust is floating in a state of equilibrium. But, in our entire ignorance of the *modus operandi* of the forces which have raised submarine strata to the tops of high mountains, we can not insist on this as absolutely true ».

Es liegen nun aber mehrere seismische Untersuchungs-Ergebnisse vor, welche die « Wurzeltheorie » zu bestätigen scheinen. Bei näherer Betrachtung erweisen sie sich aber entweder als nicht beweiskräftig oder als unrichtig.

Gutenberg ⁽¹¹⁾ schliesst in seiner Abhandlung « Seismological evidence for roots of mountains » aus einer Abnahme der normalen Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten der P_n - und \bar{P} - sowie zwischen der P^* - und P - Welle um etwa 2 Sekunden im Alpengebiet auf eine etwa 20 km dicke Wurzel des Gebirges, d. h. auf eine ent-

sprechende Verdickung des Sials. Eine Vergrößerung der Geschwindigkeit der \bar{P} -Welle um nur ein Zehntel km/sec, die bei der starken Kompression, unter der das Gestein im Gebirge steht, mehr als wahrscheinlich ist, würde die Verringerung der Zeitdifferenzen zwischen P_n und \bar{P} sowie P^* - und \bar{P} und damit auch die Gebirgswurzel zum Verschwinden bringen.

Wanner ⁽¹²⁾ hat nun aber bei der Auswertung der seismographischen Aufzeichnungen von Nahbeben, von denen das Walliser-Beben

Kurven der gleichen Schwereabweichung in Milligal nach Th. Niethammer K. Schütte u. C. Morelli.

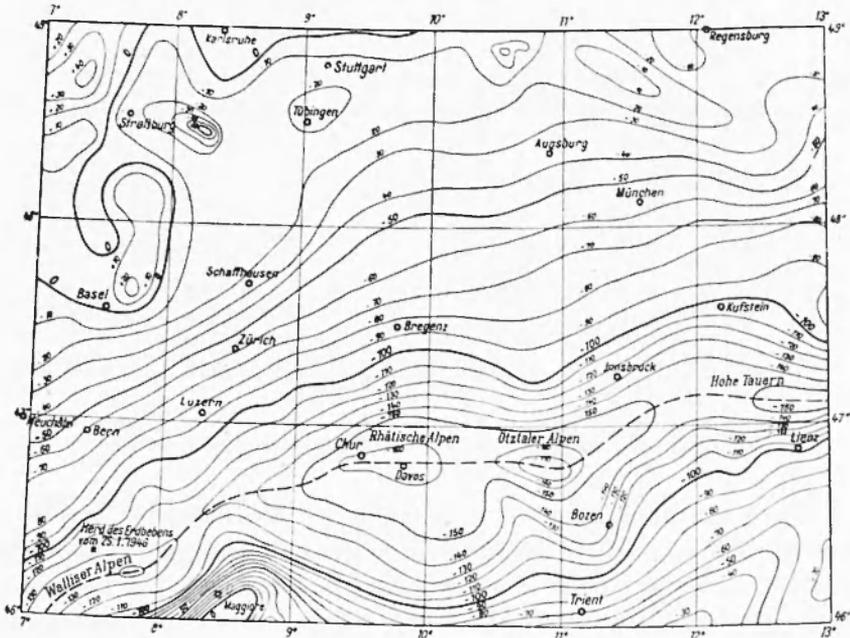


Fig. 6 - Linien gleicher Bouguer-Schwere-Anomalien in den Alpen und Lage des Epizentrums des Walliser Erdbebens vom 25. Januar 1946.

vom 25. Januar 1946 das stärkste war, ebenfalls Verzögerungen der Einsätze der P_n -Welle ermittelt und sie auf eine Gebirgswurzel zurückgeführt. Die « Verzögerungen » betragen in Basel 0.6 sec, in Zürich 1.4 sec und in Chur 2.1 sec, waren also unter dem Gebirgskamm am grössten und fielen dort mit der grössten Bouguer-Anomalie zusammen (Fig. 6). Andererseits ergab sich in Neuchâtel ein Zeitgewinn von 1.1 sec, so dass der erste Einsatz nach der Ansicht von Wanner « sicher nicht die P_n -Welle sei ». Die Verzögerung in Basel wird als

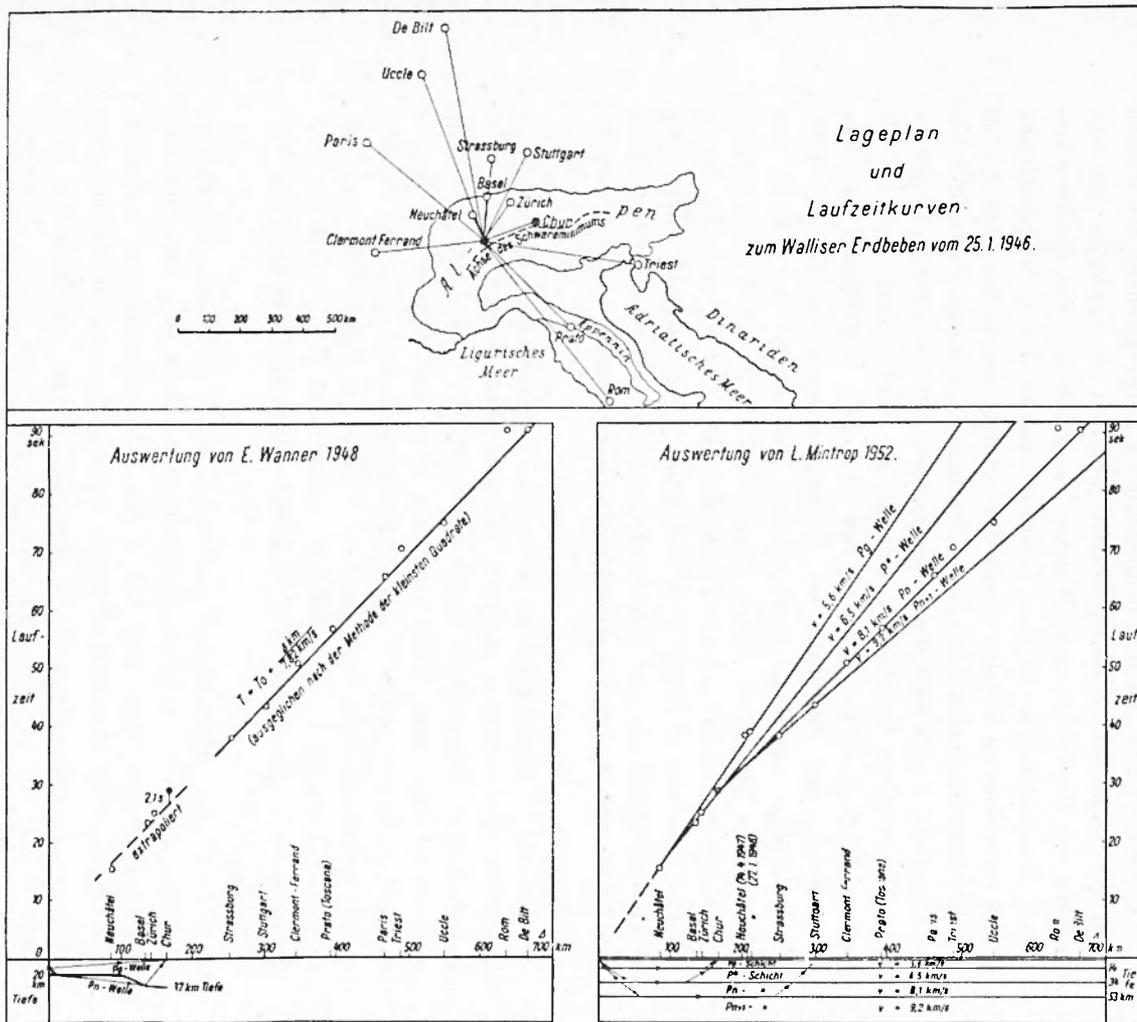


Fig. 7 - Lageplan und Laufzeitkurven zum Walliser Erdbeben vom 25.1.1946.

im Bereich der unvermeidlichen Zeitfehler angesehen, diejenige in Zürich schon nicht mehr, während über die 2.1 sec in Chur als Beobachtungsfehler gar nicht diskutiert werden könnte.

Es handelt sich bei den beanstandeten Zeitdifferenzen tatsächlich nicht um Beobachtungsfehler, sondern lediglich um Fehler in der Auswertung der Beobachtungen. *Wanner* hat nämlich, « um die verschiedenen Doppeleinsätze in den Seismogrammen der Gebirgsstationen besser entwirren zu können », mit der Analyse der ersten Einsätze an den Flachlandstationen Strassburg, Stuttgart, Clermont, Paris und Uccle begonnen, « weil dort die Untergrundstruktur wesentlich einfacher sei ». Die mittlere Geschwindigkeit der P_n -Welle ergab sich zu 7.82 km/sec (Fig. 7 links). *Wanner* hat nun alle Differenzen zwischen Beobachtung und Rechnung auf die Laufzeitkurve für die P_n -Welle bezogen, ohne daran zu denken, dass die ersten Einsätze an den Nahstationen Neuchâtel, Basel, Zürich und Chur von Wellen herrühren, die in Schichten gelaufen sind, die über der P_n -Schicht liegen. (Figur 7 rechts). *Wanner* geht von einer « Normaldicke » der Erdkruste von 20 km aus und berechnet den « Tiefgang der Alpenfaltung » zu 37 km, wovon also 17 km auf die « Gebirgswurzel » entfallen (Fig. 7 links).

Da die Verbindungslinie zwischen Epizentrum und Chur im Streichen des Gehirges verläuft, *Wanner* den Beginn der Wurzel zwischen Epizentrum und Chur annimmt, die Achse des Schwereminimums aber nach Südwesten hin über das Epizentrum hinaus verläuft, so kann die von *Wanner* herechnete Wurzel nicht die Ursache des Schwereminimums sein. Die von *Wanner* im Jahre 1930 veröffentlichten Laufzeiten zu dem 40 km östlich vom Walliser-Beben stattgefundenen Visper-Beben vom 15.4.1924 zeigen in Chur keinerlei Verzögerung (Fig. 8).

Wenn eine Alpenwurzel vorhanden wäre, so müsste sie sich in den Laufzeitkurven bemerkbar machen, die quer zum Streichen des Gebirgzuges bzw. quer zur Achse des Schwereminimums verlaufen. Der Lageplan der Figur 9 enthält die Epizentren von fünf italienischen Erdbeben, deren Aufzeichnungen auf zahlreichen Stationen, darunter Rom, Pavia, Chur Zürich und Stuttgart, von *Caloi* (^{13, 14}), *Di Filippo & Marcelli* (^{15, 16}), *Rosini* (¹⁷) und *Valle* (¹⁸) einer sehr eingehenden Bearbeitung unterzogen worden sind. Der Verfasser hat die von den genannten Autoren veröffentlichten Laufzeiten der $P_g (= P)$ -, P^* -, und P_n -Wellen in einem sehr grossen Masstabe in Abhängigkeit von der

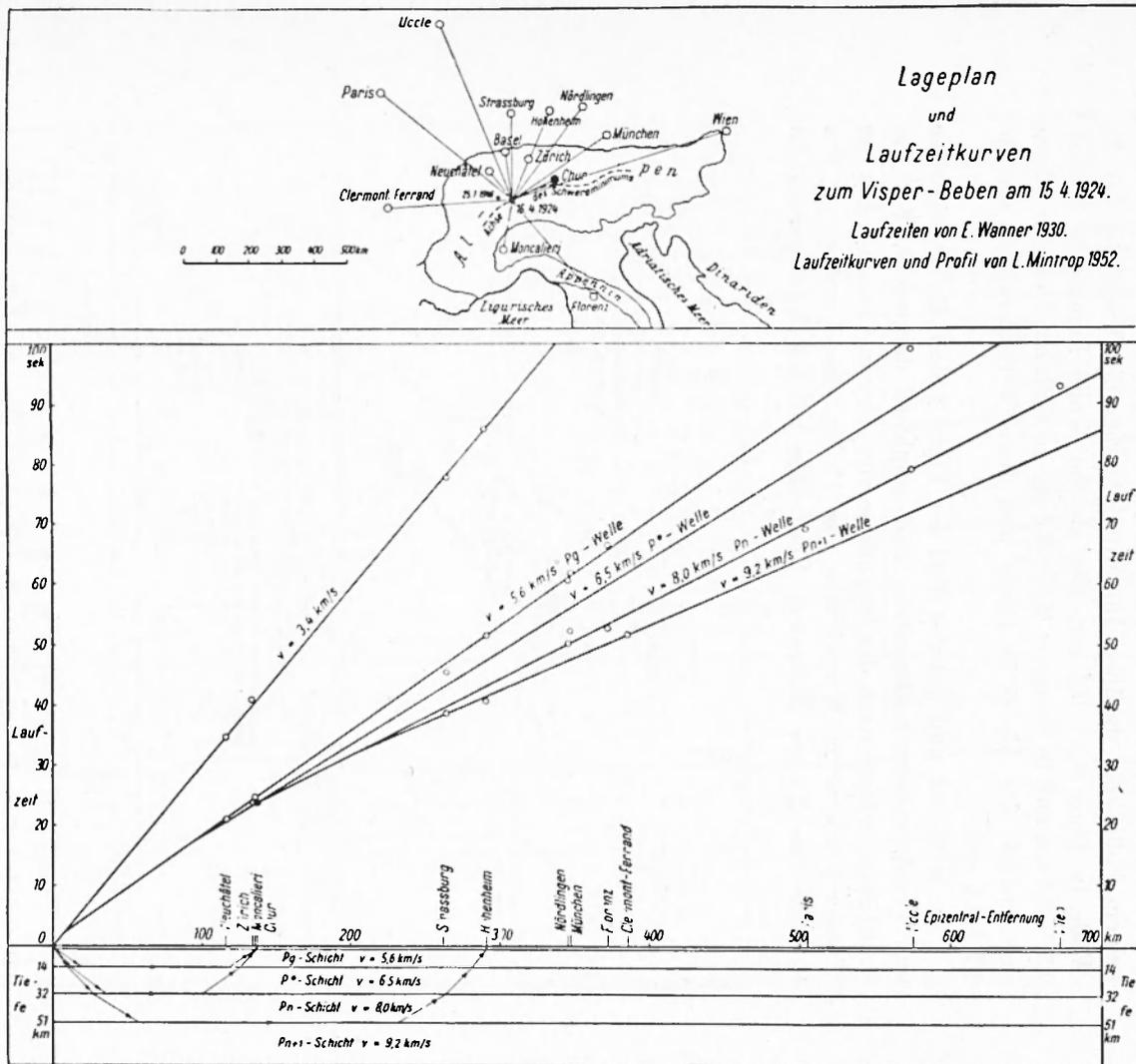


Fig. 8 - Lageplan und Laufzeitkurven zum Visper-Beben vom 15.4.1924.

Epizentralentfernung dargestellt (1 sec = 4 mm, 1 km = 1 mm) und die Laufzeitkurven gezogen. In diesen geradlinig verlaufenden Kurven liegen die Zeiten von Chur entweder auf der Linie oder darunter, in keinem Falle aber darüber. Im Mittel beträgt die Voreilung der P_{11} -Welle in Chur $0,3 \pm 0,2$ sec. Die gleiche Welle kommt in Zürich $0,5 \pm 0,3$ sec und in Stuttgart $0,4 \pm 0,2$ sec zu früh an. Dagegen zeigen sich südlich der Alpen in Pavia und Rom Verzögerungen von je $0,7 \pm 0,4$ sec.

Im mittleren und unteren Teil der Figur 9 sind die Voreilungen und Verzögerungen zahlenmässig und graphisch dargestellt. Wie das Profil zeigt, müsste nach der Hypothese von Airy in Chur bei der von Wanner berechneten Wurzeldicke von 17 km eine Verzögerung der P_0 -Welle von 2,3 sec auftreten. Von einer solchen Verzögerung ist

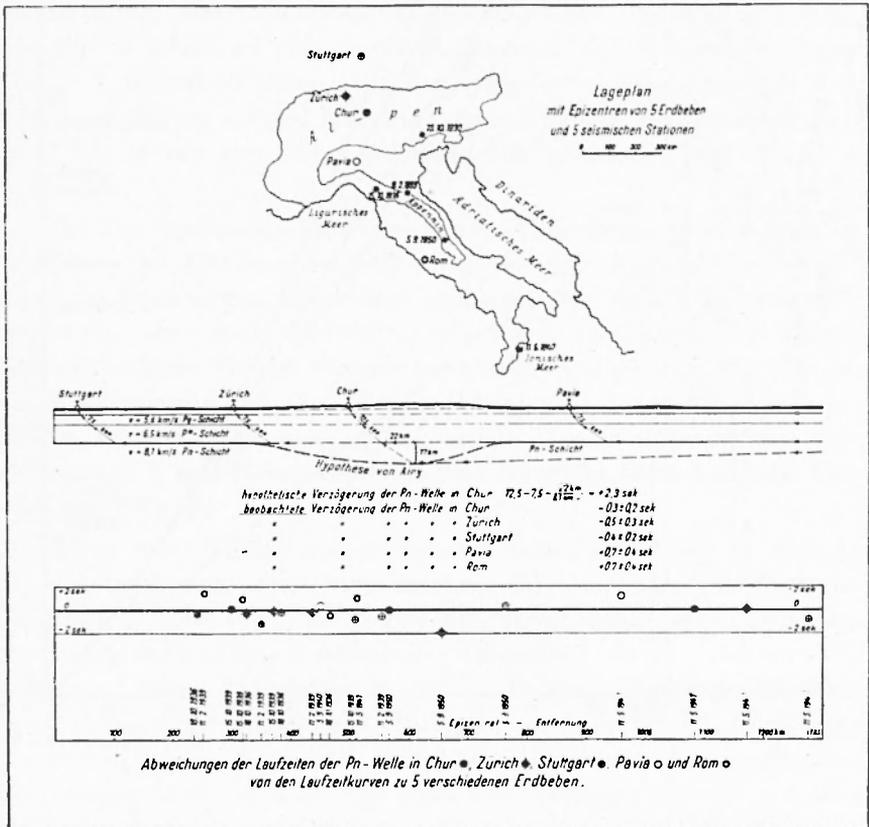


Fig. 9 - Lageplan mit Epizentren von 5 Erdbeben und 5 seismischen Stationen sowie Abweichungen der Laufzeiten der P_{11} -Welle.

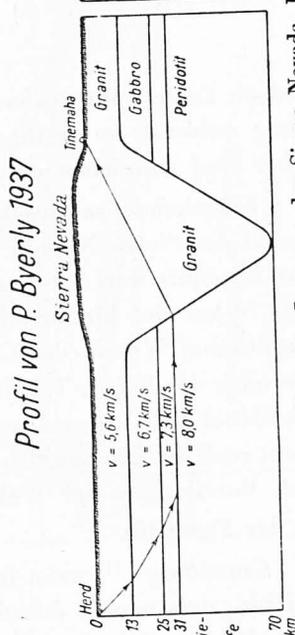
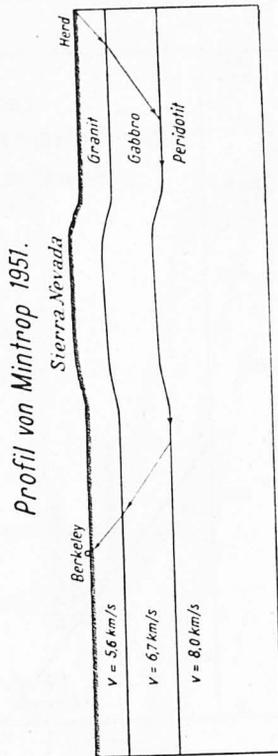
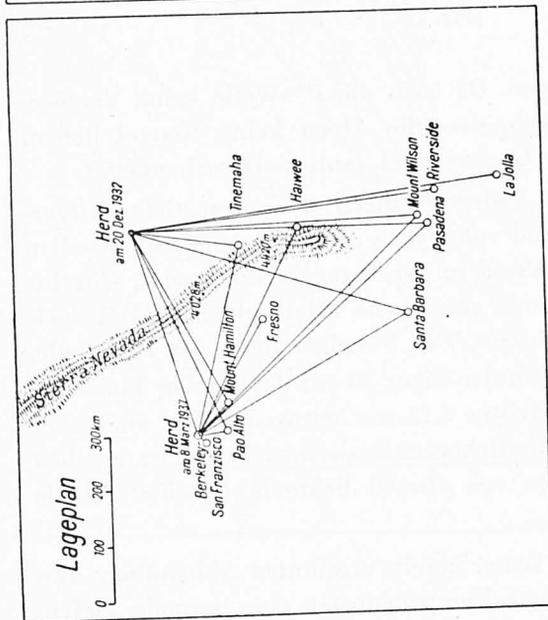
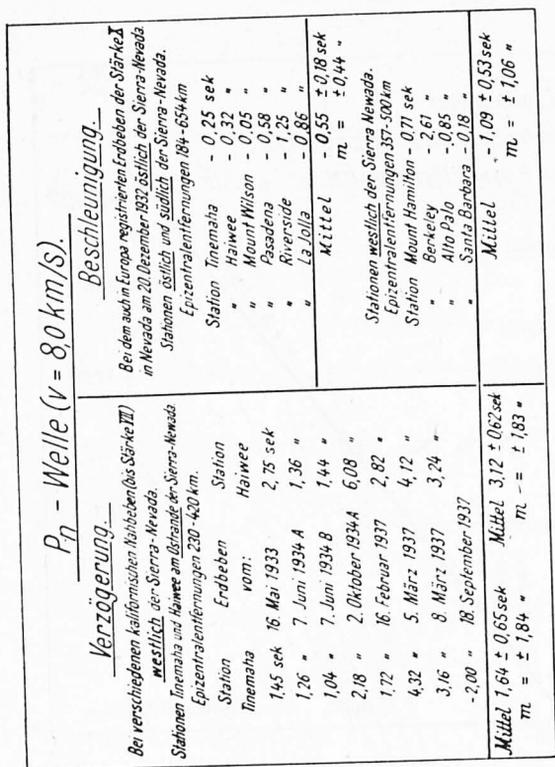


Fig. 10 - Lageplan der Sierra Nevada, Laufzeitdifferenzen und seismo-geologische Profile.

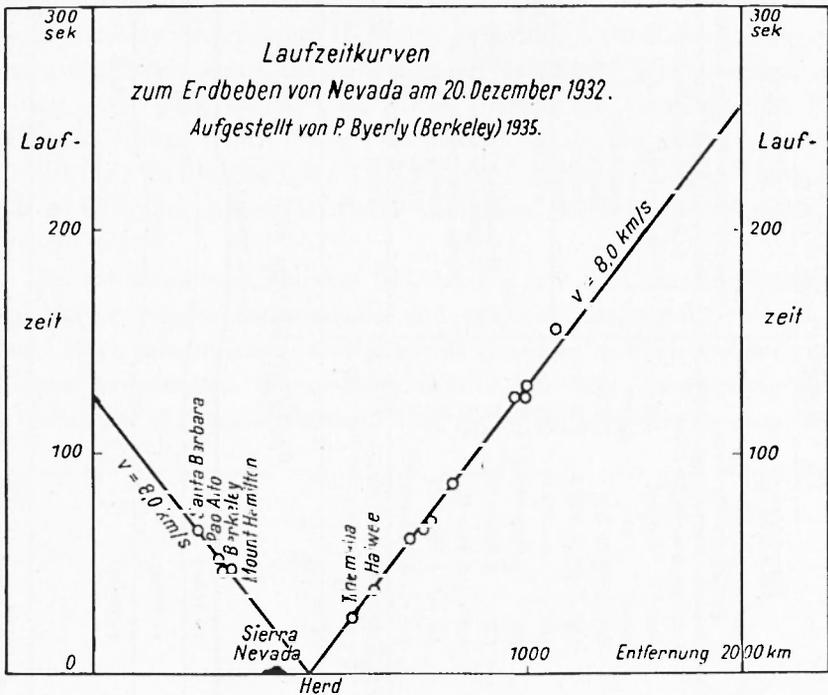


Fig. 11

jedoch keine Spur vorhanden. Da auch die P^* -Welle keine Verzögerung aufweist, so ergibt sich, dass die Alpen keine Wurzel haben. Eher sind Anzeichen einer Gegenwurzel (anti-root) vorhanden.

Eingehende seismische Untersuchungen über den tiefen Untergrund der Sierra Nevada sind von *Byerly* (^{19, 20, 21}) angestellt worden. Ihr Ergebnis war, wie das Profil in der Figur 10 links zeigt, eine bis fast 70 km tief hinabreichende granitische (vielleicht zum Teil auch basaltische) Wurzel des Gebirges. Die Verzögerungen der P_n -Welle, die nach der linken Tabelle in der Figur 10 auf der Station Tinemaha im Mittel 1.64 sec und in Haiwee 3.12 sec betragen sollen, sind aber nicht reell. Sobald nämlich die Bebenstärke genügend gross ist, ergeben sich Voreilungen der Wellen von etwa 1 Sekunde (Rechte Tabelle in der Figur 10).

Gutenberg (¹¹) weist in seiner bereits erwähnten Abhandlung darauf hin, dass neuere seismische Untersuchungen eine normale Tiefenlage des Granits unter der Sierra Nevada ergeben hätten, aber An-

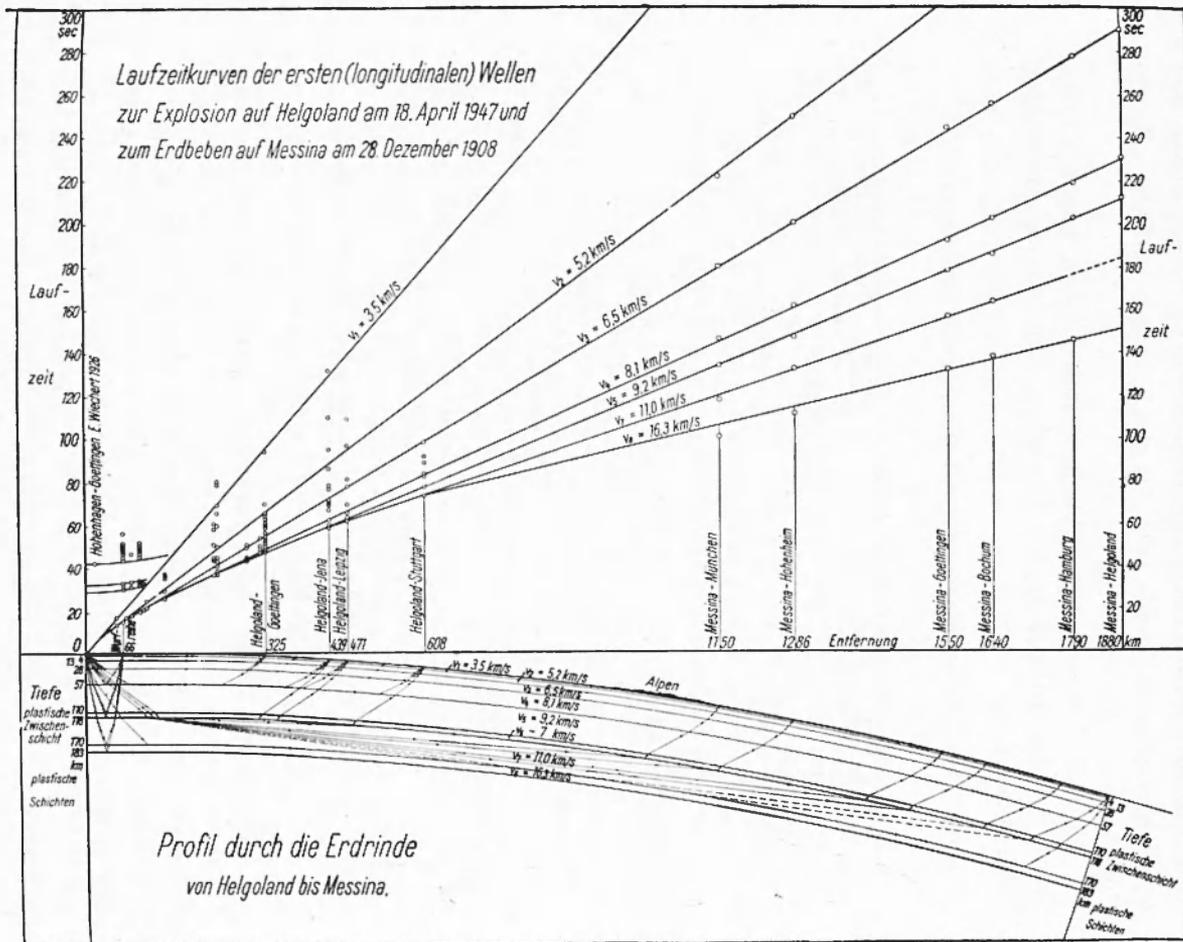
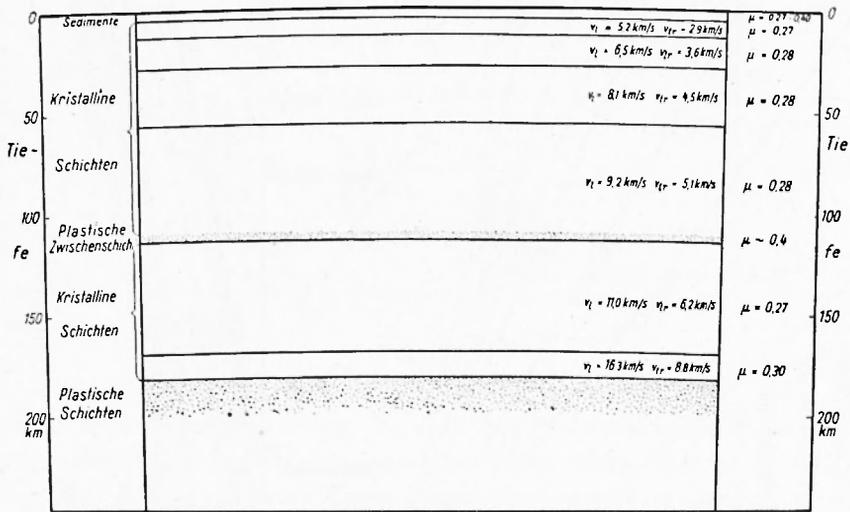


Fig. 12 - Laufzeitkurven und seismo-geologisches Profil durch die Erdkruste nach Mintrop.

zeichen für eine Verdickung der zwischen Granit und Peridotit (Wellengeschwindigkeit 8 km/sec) liegenden Schichten vorhanden seien. Die Laufzeitkurven für das Erdbeben von Nevada am 20. Dezember 1932, das die Stärke X hatte, sind aber auf beiden Seiten, östlich und westlich, der Sierra Nevada (Fig. 11) gleich, so dass auch die « Basaltwurzel » nicht vorhanden ist.

Die bisherigen seismischen Untersuchungen haben demnach keine Stütze für die Richtigkeit der Airy'schen Annahme schwimmender Gebirge geliefert.

Seismisch ermitteltes Profil durch die Erdkruste.



Poissonsche Zahl $\mu = \frac{v_1^2 - 2v_2^2}{2v_1^2 - v_2^2}$ Zum Vergleich: Gußeisen $\mu = 0,27$, Stahl $\mu = 0,28$, Blei $\mu = 0,43$.

Fig. 13 - Seismo-geologisches Profil durch die Erdkruste nach Mintrop.

Eine grosse Wende in der seismographischen Erforschung der Erdkruste ist am 18. April 1947 eingetreten, an welchem Tage auf Helgoland vier Millionen Kilogramm 20 m unter der Oberfläche der Felseninsel in Tunneln lagernde Munition « in einem Schuss » zur Detonation gebracht worden sind. Dieses « künstliche Erdbeben » ist von vielen Seismologen sehr eingehend untersucht worden. Seine Aufzeichnungen in Deutschland und die Registrierungen des katastrophalen Erdbebens von Messina am 28. Dezember 1908 dienen dem Verfasser (22, 23) zur Aufstellung der in den Figuren 12 und 13 wiedergegebenen Profile durch die Erdkruste. Nach ihnen tritt die erste plastische

Schicht erst in einer Tiefe von 110 km auf. Es ist deshalb ganz unmöglich, dass die Gehirge wie Eisberge im Substratum schwimmen. Das Sial kann gar nicht in das Sima eintauchen, weil letzteres kristallin und nicht etwa plastisch ist. Die Poisson'schen Zahlen sind, wie die Figur 13 zeigt, bei allen Schichten (mit Ausnahme der plastischen) bis zur Tiefe von 170 km die gleichen wie für Stahl bei Zimmertemperatur. Die Wellengeschwindigkeiten für die plastische Zwischenschicht konnten nicht bestimmt werden, die Poisson'sche Zahl wird auf 0,4, etwa gleich der des Bleies, geschätzt.

Die für den Peridotit und für die darüber liegenden Schichten (Gabbro, Granit und Sedimente) vom Verfasser ermittelten Wellengeschwindigkeiten decken sich mit den Ergebnissen anderer Auswerter der Helgoland-Sprengung, die sich aber sämtlich auf die Untersuchung dieser Schichten beschränkt haben.

Über die Schicht in 57 km Tiefe mit der Wellengeschwindigkeit 9,2 km/sec. bemerkte *Angenheister* ⁽²⁴⁾ bereits im Jahre 1926 in einer Discussion auf dem Internationalen Geologen-Kongress in Madrid:

« Die seismischen Wellen erfahren eine sehr gut ausgeprägte Geschwindigkeitszunahme in 60 km Tiefe. Dort muss eine elastische Discontinuität liegen. Zur Zeit werden in Deutschland Versuche gemacht, diese Discontinuität experimentell durch Sprengungen festzustellen.

Stoneley ⁽²⁵⁾ schrieb in seiner Veröffentlichung über die Bearbeitung der Laufzeiten zum Erdbeben auf der griechischen Insel Kephallenia vom 18. August 1926 über die gleiche Schicht:

« Not all the large residuals, however, can be thus explained. Four points, fitting closely to a straight-line-graph (within 1.2 sec as subsequent computations prove) indicate a wave travelling with the velocity 9.1 km/sec. These could be scarcely be the early *P*-wave of Mohorovicic, and the agreement is doubtful accidental. Presumably microseism makes the beginning difficult to read ».

Mit einer plastischen Zwischenschicht in etwa 100 km Tiefe ist von geophysikalischer und geologischer Seite schon seit langer Zeit gerechnet worden. *Wiechert* ⁽²⁶⁾ hielt bereits 1897 für die Erklärung der sichtharen Erhebungen und Einsenkungen der Erdoberfläche sowie der noch heute auf ihr stattfindenden Massenverlagerungen eine plastische Zwischenschicht für erforderlich, die nur von verhältnismässig geringer Dicke sein könnte. *Hayford* ⁽⁶⁾ nahm die Dicke zu 16 km an, *Daly* ^(27, 28) schätzt sie auf etwa 20 km bei einer Tiefenlage von

rd 100 km. *Mohorovicic* ⁽²⁹⁾ hielt bereits im Jahre 1916 auf Grund von seismischen Messungen eine Discontinuitätsfläche in einer Tiefe von 120 km für höchstwahrscheinlich. *Doelter* ⁽³⁰⁾ verlangte schon lange bevor *Hayford* ⁽⁶⁾ und *Helmert* ⁽³¹⁾ aus Lotablenkungen und Schweremessungen in 113 bzw. 118 km Tiefe eine isostatische Ausgleichsfläche angegeben hatten und *Mohorovicic* seismische Anzeichen fand, eine Tiefe der primären Vulkanberde von wenigstens 120 km Tiefe. *Born* ⁽³²⁾ nahm eine tatsächliche Ausgleichszone als Übergangszone an der Unterseite der festen Erdkruste an, die viele Kilometer Mächtigkeit habe und in den einzelnen Krustenteilen verschieden dick sei.

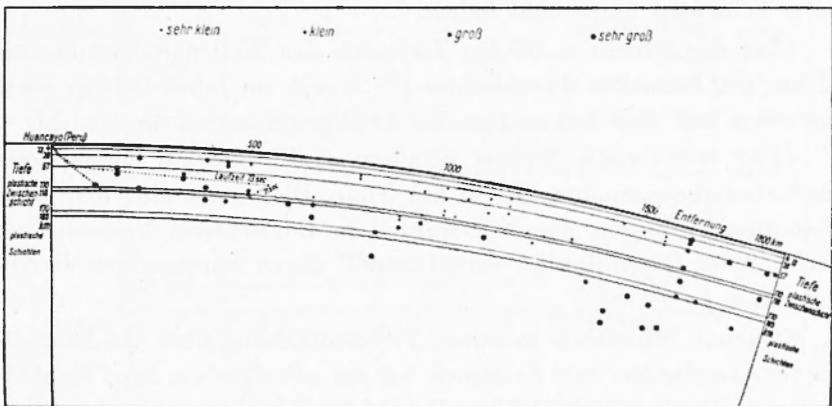


Fig. 14 - Seismo-geologisches Profil durch die Erdkruste nach *Mintrop* und Amplituden von Vorläufern zu Erdbeben in verschiedener Tiefe nach *Gutenberg*.

Gutenberg ⁽³³⁾ und *Richter* haben in den in Huancayo registrierten Seismogrammen zahlreicher Erdbeben verschiedener Epizentral-Entfernungen und unterschiedlicher Herdtiefen die Amplituden des ersten Einsatzes untersucht und sind dabei zu der Vermutung gekommen, dass sich in etwa 100 km Tiefe eine plastische Schicht befinden müsse, die sich in den Seismogrammen bzw. Laufzeitkurven als Schattenzone verrate. Wie das Profil der Figur 14 zeigt, fällt diese Zone mit der vom Verfasser gefundenen plastischen Schicht zusammen. Noch im Jahre 1938 hatte *Daly* ⁽²⁷⁾ die Bestätigung dieser plastischen Schicht als eine Zukunftsaufgabe der Seismologen bezeichnet.

In den Figuren 15 und 16 sind Seismogramme zum Erdbeben von Messina reproduziert, in denen vor dem ersten scharfen Einsatz sehr, sehr kleine Vorwellen auftreten, deren Geschwindigkeit 11.0 km/sec beträgt. *Benndorf* ⁽³⁴⁾ beobachtete die gleiche Geschwindigkeit bereits im Jahre 1905 und *Angenheister* ⁽³⁵⁾ 1921. In dem von ihm mitbe-

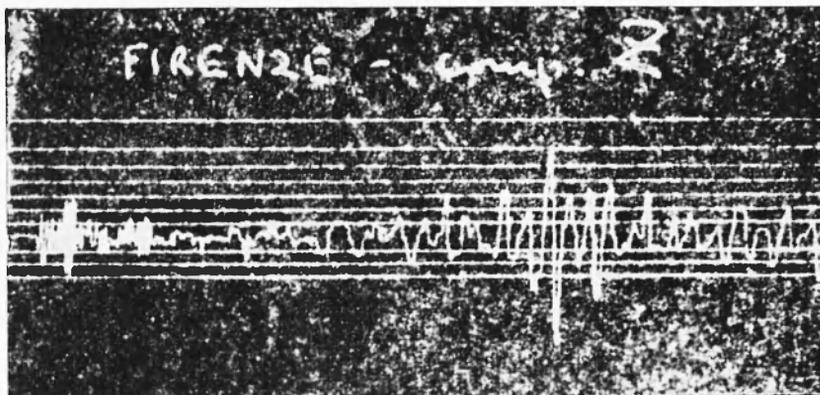


Fig. 15 - Vertical-Seismogramm von Florenz zum Erdbeben von Messina am 28. Dezember 1908.

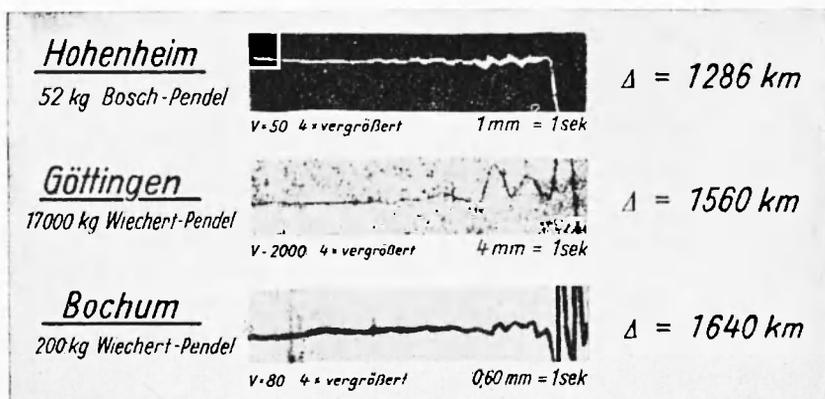


Fig. 16 - Vorläufer in Seismogrammen von Bochum, Göttingen und Hohenheim zum Erdbeben von Messina am 28. Dezember 1908.

nutzten in Apia aufgenommenen Seismogramm der Figur 17 zu einem Erdbeben auf dem Tongaplateau fehlt der schwache Voreinsatz, was darauf hindeuten könnte, dass die plastische Zwischenschicht, wenigstens in diesem Teile des Pazific, fehlt.

Unter der 11.0 km/sec-Schicht liegt noch eine verhältnismässig dünne Schicht mit der enorm hohen Geschwindigkeit der longitudina-

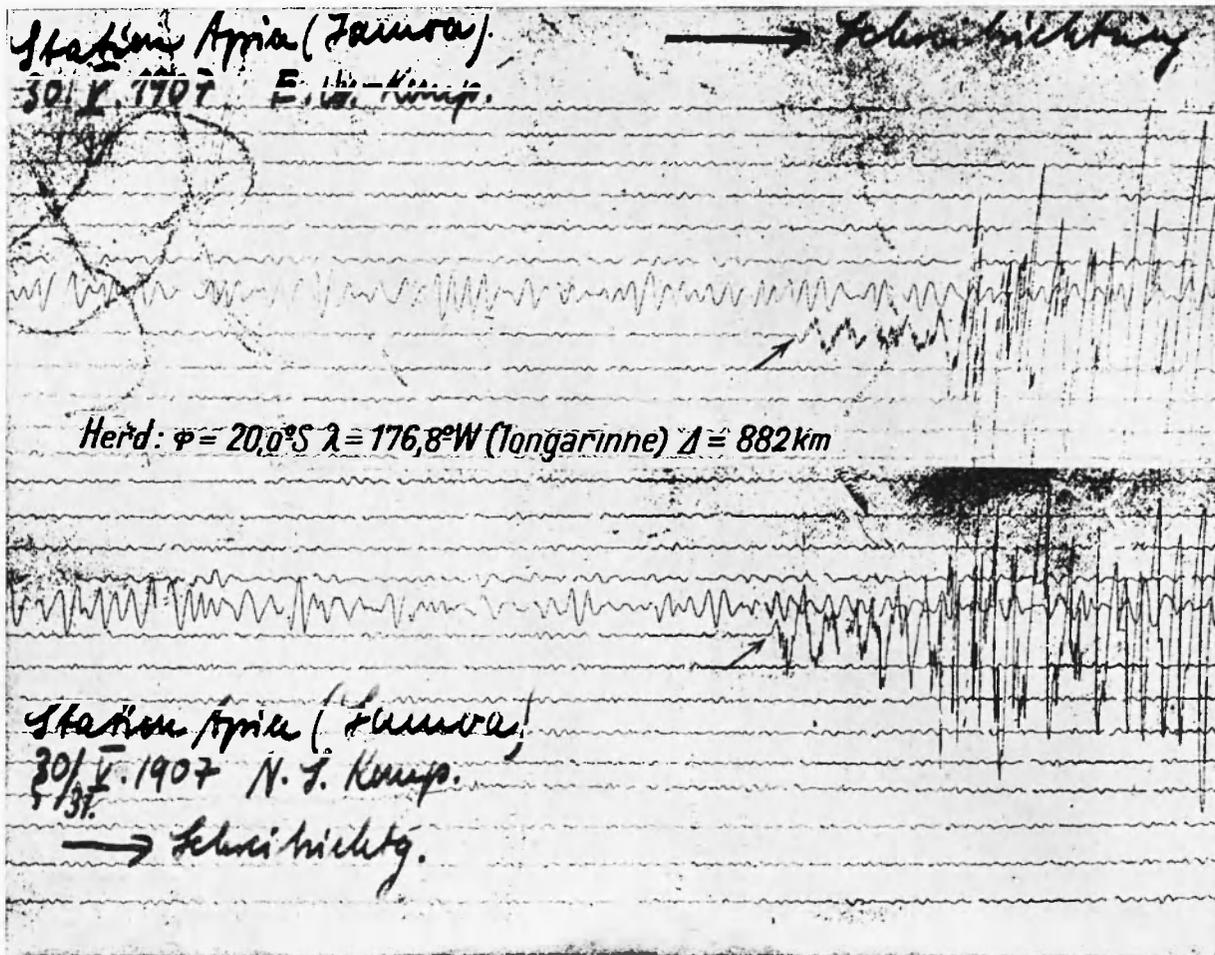


Fig. 17 - Horizontal-Seismogramme von Apia zum Erdbeben auf dem Tonga-Plateau vom 31. Mai 1907.

len Welle von 16.3km/sec. Auch diese, bisher unbekannte Schicht ist, wie die Poisson'sche Zahl 0.30 (Fig. 13) zeigt, kristallin. *Wiechert* ⁽³⁶⁾ hatte bereits im Jahre 1926 bei Fernsprengversuchen in den Aufzeichnungen des von ihm konstruierten Vertikal-Seismographen mit zweimillionenfacher Vergrößerung Reflexionen aus diesen tiefen Horizonten gefunden. Da die Sprengentfernung nur 18 km betrug, so ist bei dem felsigen Untergrund von Sprengstelle und Station eine Verwechslung mit Schichtwellen ausgeschlossen. *Krumbach* ⁽³⁷⁾ herrechnete die Tiefe einer reflektierten Schicht zu 146 km, benutzte dabei aber eine Wellengeschwindigkeit von nur maximal 8 km/sec.

In 183 km Tiefe scheint plastisches Material zu beginnen, wie aus Reflexionen an dieser Grenzfläche und aus anderen Anzeichen in den Seismogrammen geschlossen werden kann. *Schweydar* ⁽³⁸⁾ herrechnete aus dem Verlauf der Schwere im Küstengebiet die durchschnittliche Dicke der festen Erdkruste unter der Kontinenten zu etwa 200 Kilometer.

Die ausgezeichnete Übereinstimmung der Beobachtungsergebnisse bei der Sprengung auf Helgoland mit den Resultaten der Untersuchungen von *Caloi, Di Filippo & Marcelli, Rosini* und *Valle* an P^* - und P_n -Wellen von 5 italienischen Erdbeben geht aus der Figur 18 hervor.

Alles in allem haben die seismischen Untersuchungen einen Aufbau der Erdkruste ergeben, mit dem sich Vorstellungen, wie *Airy* sie einmal hatte, nicht vertragen. Was für die Hypothese von *Airy* gilt, gilt auch für die Einknickungstheorie (buckling hypothesis) von *Vening-Meinesz*, ^(39, 40, 41) nach der die Erdkruste bei seitlichem Zusammenschub der Schichten nach unten eingeknickt anstatt nach oben aufgewölbt werden soll. *Vening-Meinesz* erklärt Streifen von isostatischen negativen Schwereanomalien im Indischen Archipel, im Antillenbogen und an anderen von ihm untersuchten Stellen der Erd — hzw. Meeresoberfläche durch Sialwülste, die in das spezifisch schwerere Sima hinahgedrückt worden sein sollen. Seine Theorie unterscheidet sich demnach, wenigstens was ihre Auswirkung auf die Deutung von negativen Schwere-Anomalien betrifft, nicht wesentlich von der Hypothese von *Airy*. Infolgedessen gilt auch das dort bereits Gesagte, dass nämlich eine solche Einknickung schon deshalb nicht möglich ist, weil die erste nachgiebige (plastische) Schicht erst in 110 km Tiefe beginnt. Isostatisch reduzierten Schwerewerten kommt auch solange keine geologische Bedeutung zu, wie der *modus operating*, wie *Airy* es ausgedrückt hat, unbekannt bleibt. Anders verhält

es sich mit der Bouguer-Anomalie, weil bei ihrer Berechnung nicht von einer vorgefassten Meinung über den *modus operating* ausgegangen wird.

In der Figur 19 ist die geographische Situation im Indischen Archipel sowie die Achse der negativen Anomalie nach *Vening-Meinesz* dargestellt. Ausserdem enthält der Lageplan den Verlauf von zwei

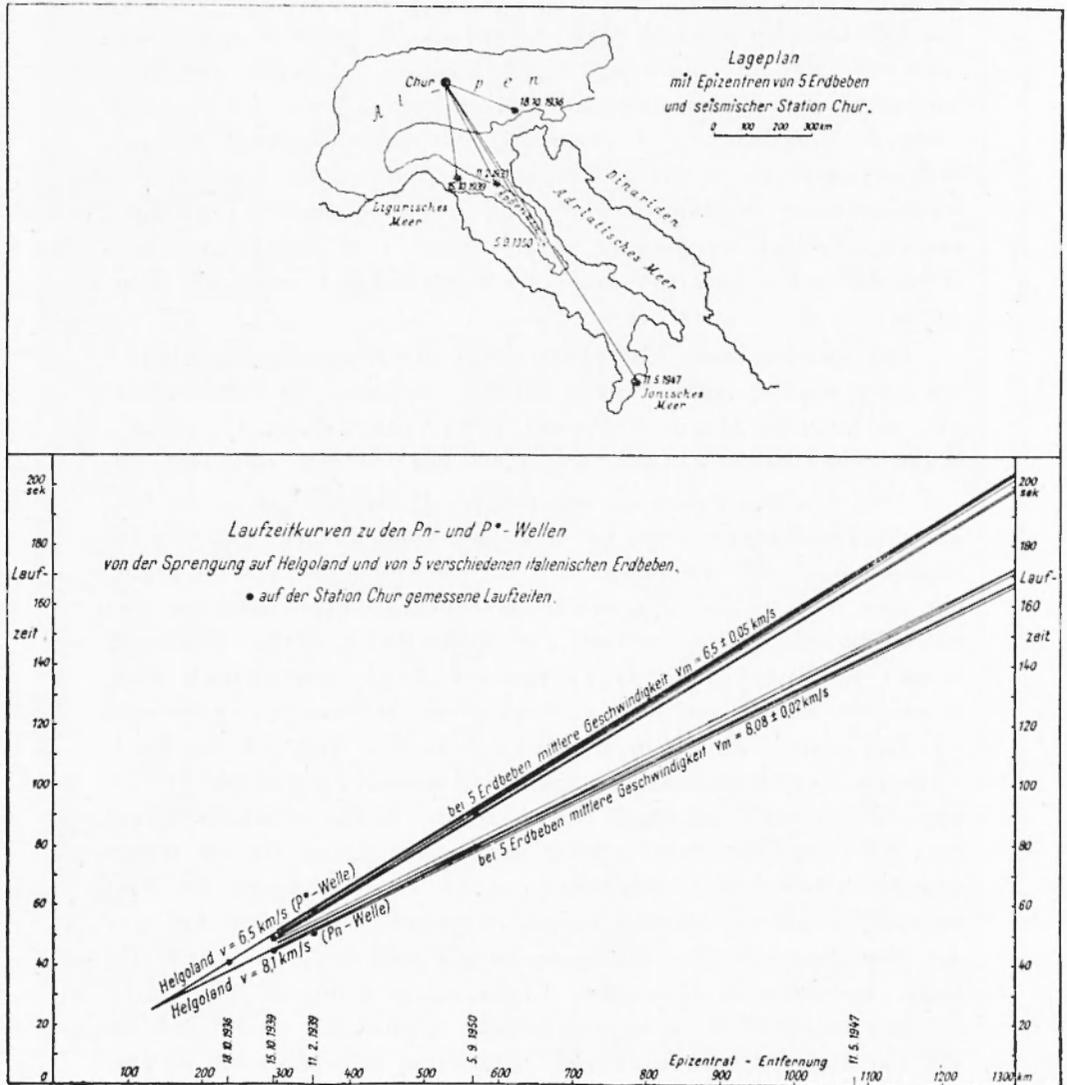


Fig. 18 - Lageplan mit Epizentren und Laufzeitkurven zu den P* und Pn-Wellen bei der Sprengung auf Helgoland und bei 5 italienischen Erdbeben.

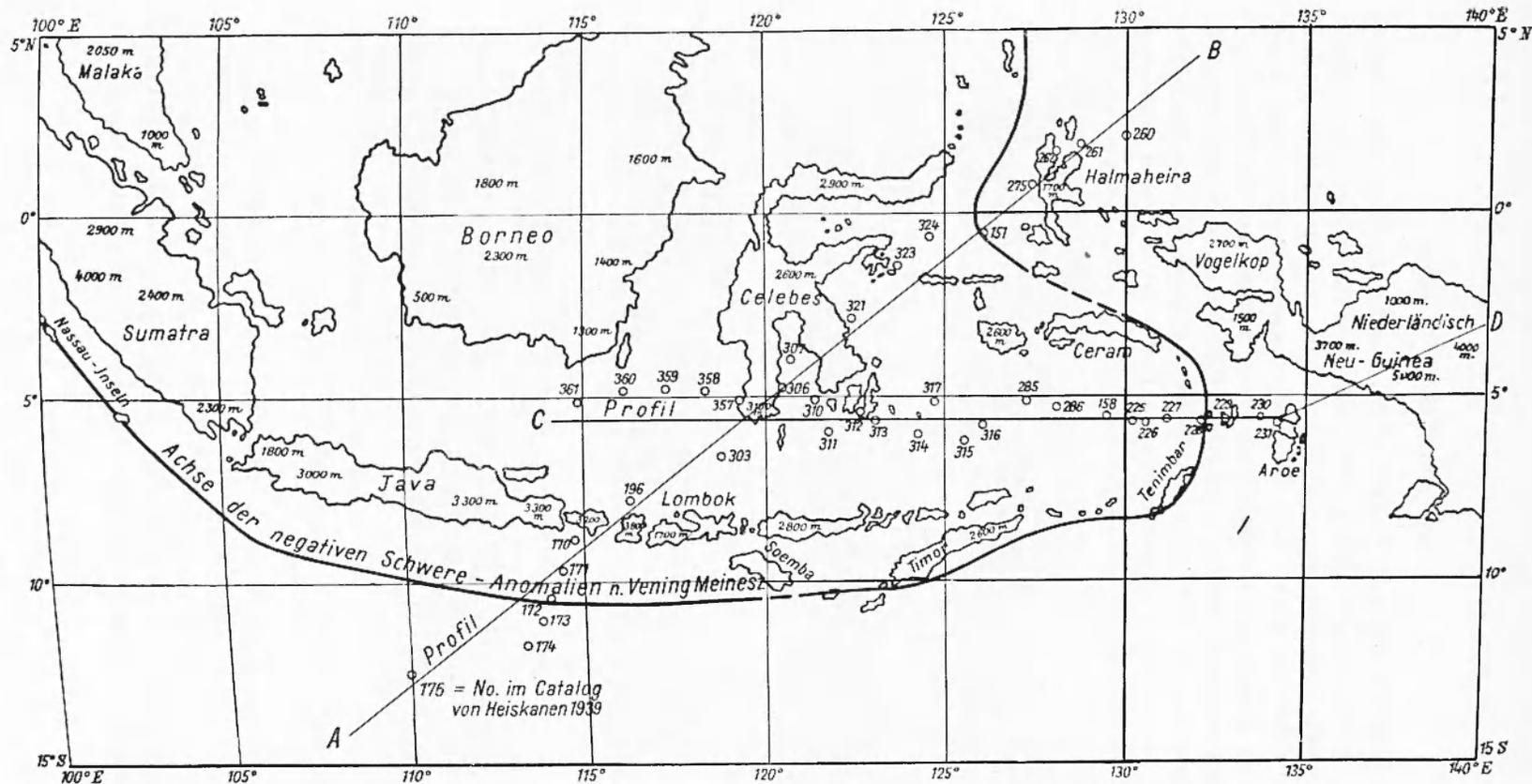


Fig. 19 - Lageplan zu den Schweremessungen von Vening-Meinesz im Indischen Archipel.

Profilen *AB* und *CD*. Es fällt zunächst auf, dass die Achse links in der Figur mit der Achse der Sumatra vorgelagerten Nassau-Inseln zusammenfällt und sich im mittleren Teile mit der Achse submariner Aufwölbungen deckt. Alle Querprofile senkrecht zum Verlauf der Achse zeigen die gleiche Erscheinung, worauf *Vening-Meinesz* ⁽⁴¹⁾ selbst bereits hingewiesen hat. Das Minimum ist demnach auf diese Inseln bzw. auf die submarinen Rücken zurückzuführen. Die in den Figuren 20 und 21 wiedergegebenen Profile lassen diesen Zusammen-

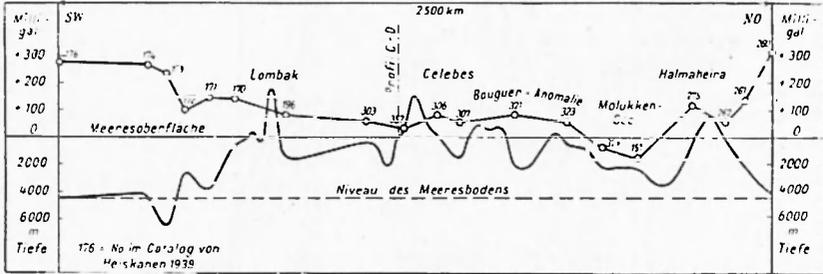


Fig. 20 - Profil der Bouguer-Schwere-Anomalien nach der Linie *AB* in der Figur 19.

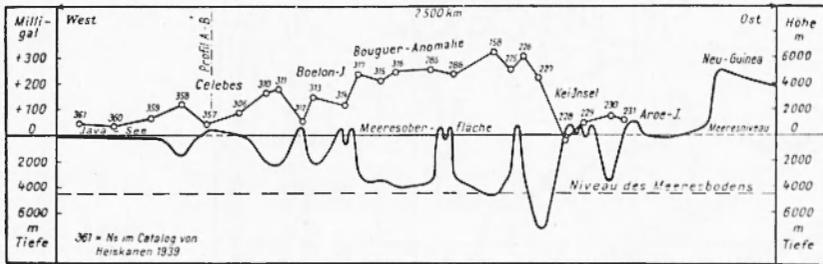


Fig. 21 - Profil der Bouguer-Schwere-Anomalien nach der Linie *CD* in der Figur 19.

hang klar erkennen. Zwischen ihnen und dem in der Figur 22 dargestellten Profil von Manila bis Honolulu mit den Philippinen, den Inseln Yap und Guam sowie den Hawai-Inseln besteht kein prinzipieller Unterschied. Es ist deshalb, wie auch *Gerth* ⁽⁴²⁾ bei geologi-

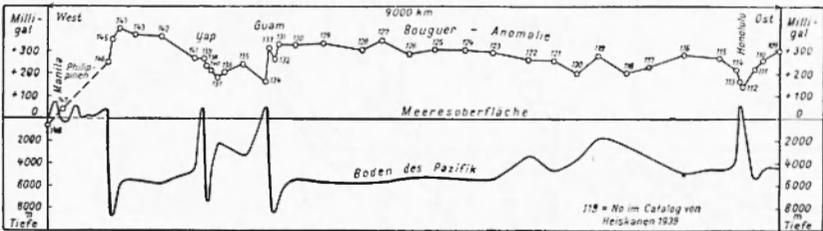


Fig. 22 - Profil der Bouguer-Schwere-Anomalien von Manila bis Honolulu.

schen Vergleichen feststellt, nicht ersichtlich, weshalb im Indischen Archipel ein Sonderfall angenommen wird, zumal auch das in der Figur 2 wiedergegeben Profil von den Alpen bis Sizilien in der Poebene ein ähnliches Minimum zeigt.

Die Einknickungstheorie von *Vening-Meinesz* schien in den Versuchsergebnissen seines Mitarbeiters *Kuenen* ⁽⁴³⁾ eine Stütze gefunden zu haben, bei denen, wie die Figur 23 illustriert, eine auf der Wasser-

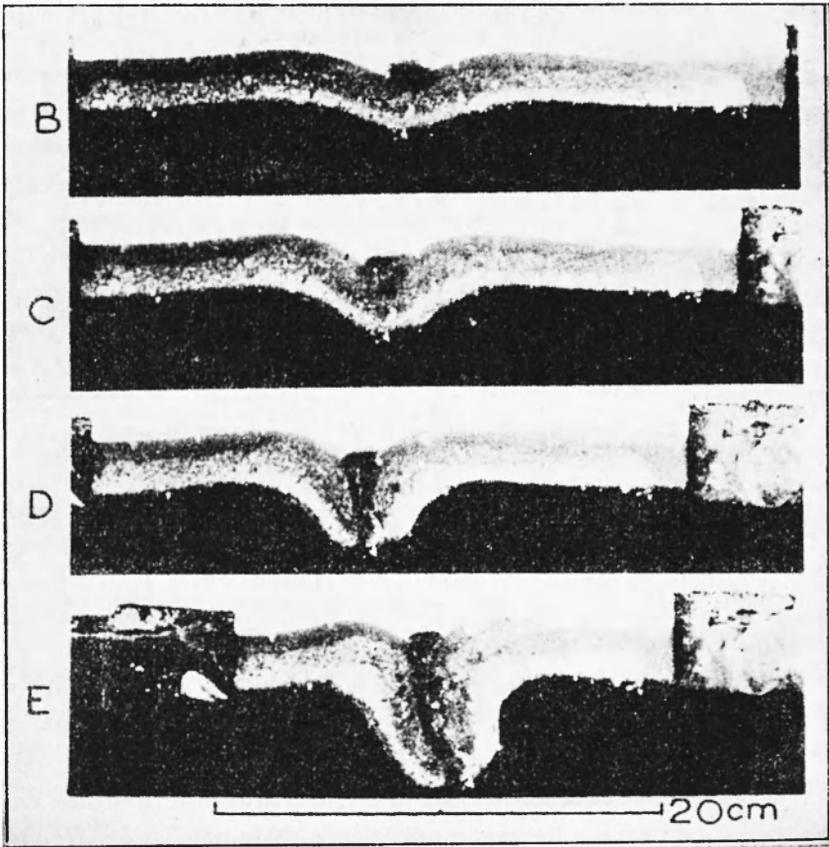


Fig. 23 - Modell-Versuch von *Kuenen* zur Einknickungstheorie von *Vening-Meinesz*.

oberfläche schwimmende Paraffin-Schicht beim seitlichen Zusammenschieben nach unten eingeknickt wird. Nach *Griggs* ⁽⁴⁴⁾ stellte sich diese Einknickung nach unten im allgemeinen aber nur dann ein, wenn die Knickstelle vorher etwas belastet worden war. Während *Vening-Meinesz* den Widerstand des plastischen Sinas in seinen Berechnungen

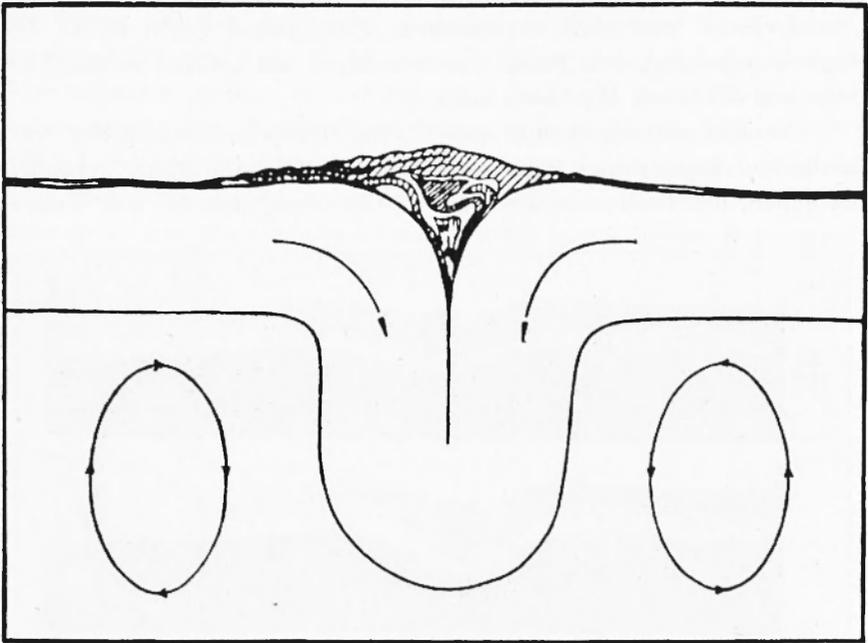


Fig. 24 - Profil zur Convections-Theorie von *Vening-Meinesz*.

vernachlässigen zu können glaubt, wies *Griggs* experimentell nach, dass keine Einknickung nach unten, sondern eine Verdickung nach oben stattfand, wenn die Viscosität des Substratums «vergleichbar» mit den wirklichen Verhältnissen in der Erde gemacht wurde. *Tromp* ⁽⁴⁵⁾, der wie *Griggs* sehr eingehend auf die Ansichten von *Vening-Meinesz* eingeht, kommt in seinem sehr lesenswerten Buche, dem auch ein ausführliches Literatur-Verzeichnis beigelegt ist, zu dem gleichen negativen Ergebnis.

Bei der ausgesprochenen Schichtung der Erdkruste und des Erdmantels sind auch die von zahlreichen Autoren, wie *Holmes*, *Griggs*, *Pekeris*, *Vening-Meinesz* u.a., unter der Voraussetzung eines nicht geschichteten Erdmantels theoretisch behandelten Strömungen, wie sie die Figur 24 zeigt, nicht möglich. *Griggs* rechnete mit dieser Unmöglichkeit, wie aus folgenden Worten hervorgeht: «The discontinuities within the crust are not considered here because it is thought that they act only as secondary modifying influences on the reaction of the crust to the subcrustal convection. It is entirely possible that this

ist erroneous, and that the crustal discontinuities play a fundamental role ».

Wenn auch geothermische Strömungen in der Art, wie sie die Figur 24 darstellt, nicht möglich sind, so kommt doch der Geothermik für die Erklärung der Verteilung von Wasser und Land sowie der Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche eine sehr wesentliche Bedeutung zu. *Boscovich* ⁽⁴⁷⁾ schrieb schon im fünften Buche seines zusammen mit *Maire* herausgegebenen grossen Werkes, das 1755 in Rom in lateinischer und 1770 in Paris in französischer Sprache erschienen ist: « Mais les montagnes se forment, je pense, pour la plupart par l'effet d'une chaleur interne qui soulève les couches de la terre les plus proches de la surface; et s'il en est ainsi, cette élévation n'ajoute aucune nouvelle matière, et le vuide renfermé dans l'intérieur de la montagne compense la masse qui le couvre ».

C. Babbage ⁽⁴⁸⁾ gab im Jahre 1847 der Ansicht Ausdruck, dass die allmählichen Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche lediglich eine Folge der durch Erwärmung oder Abkühlung verursachten Ausdehnung oder Zusammenziehung tieferer Erdschichten seien. Er zeichnete bereits geothermische Profile durch Kontinente und Ozeane sowie die Änderungen dieser Profile durch Denudation und Sedimentation. Von den zahlreichen Autoren, die Babbage's Anschauungen vertreten, sei der damalige Präsident der Liverpool Geological Society, *T. Mellard Reade* ⁽⁴⁹⁾, besonders hervorgehoben, weil er sein im Jahre 1886 erschienenes, umfangreiches und äusserst lesenswertes Buch über die Entstehung von Gebirgszügen fast ausschliesslich geothermischen Darlegungen gewidmet hat. *Reade* glaubt sogar ohne plastische Zwischenschicht auskommen zu können, die er deshalb nicht für wahrscheinlich hält, weil die darüberliegenden festen Schichten der Erdkruste dann noch sehr viel mobiler wären als sie es ohnehin schon sind.

Orstrand ⁽⁵⁰⁾ untersuchte den Verlauf der Isothermen in Gebirgen und fand, dass sie bis etwa 100 km Tiefe konvex nach oben gekrümmt seien.

Nach der Entdeckung der plastischen Zwischenschicht und bei den seit dem Erscheinen des Buches von *Reade* gewonnenen Erkenntnissen über die Wärme-Erzeugung beim Zerfall radioaktiver Elemente in der Erdkruste erscheint es zweckmässig, auf die Bedeutung der

Geothermik für die Erklärung der Konfiguration der Erdoberfläche näherinzugehen.

Die Figur 25 zeigt die ausserordentlich grossen lokalen und regionalen Unterschiede in geothermischen Tiefenstufen, die zwischen einigen und mehr als hundert Metern schwanken. Selbst in einer kleinen geologischen Struktur können die Unterschiede sehr bedeutend

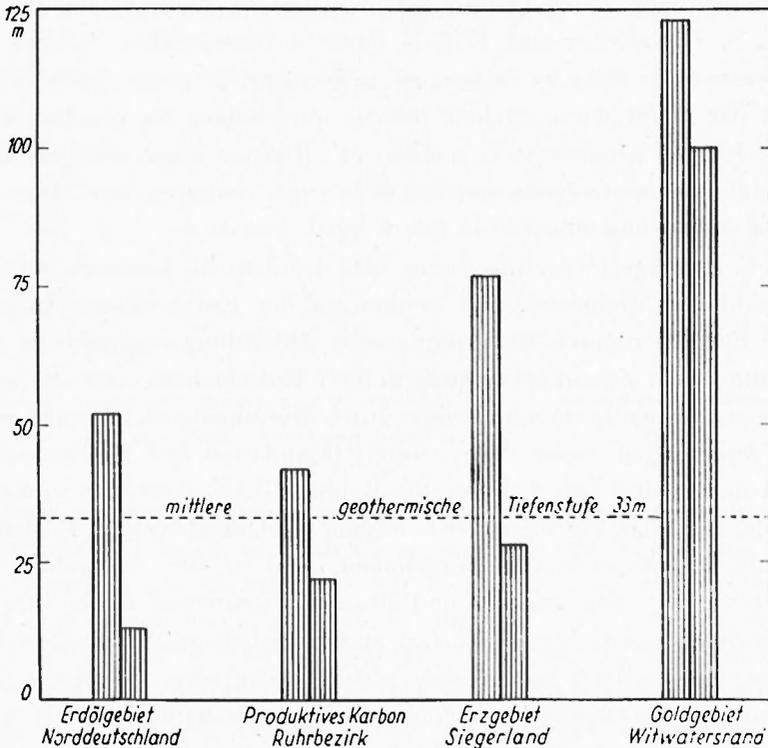


Fig. 25 - Verschiedene geothermische Tiefenstufen.

sein (Fig. 26). Nach der von *Jeffreys* (⁵¹) aufgestellten Temperaturkurve für das Erdinnere (Fig. 27) nimmt die geothermische Tiefenstufe mit der Abnahme des Gehaltes der Gesteine an Uran, Thorium und Kalium zu und beträgt in 100 km Tiefe bereits 175 m. Eingehende Untersuchungen über die Radioaktivität der Erde sind in neuerer Zeit von *Festa* (⁵²) und *Santangelo* (⁵²) durchgeführt worden.

In den Meeren nimmt die Temperatur von der Oberfläche bis zum

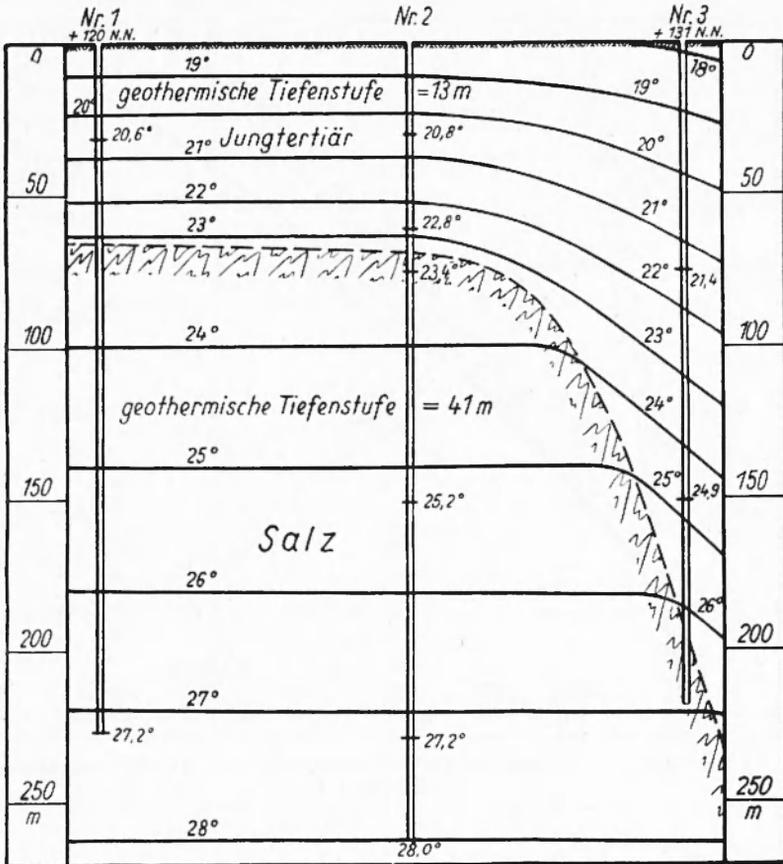


Fig. 26 - Isothermen im Profil durch eine geologische Struktur von Halbouty.

Meeresboden nicht zu, sondern bis auf fast 0° ab (Fig. 28 links). Auf der Schwedischen Albatros' Expedition 1947/48 sind in einer Ozeantiefe von 7592 m nur + 1 1/2 Grad Celsius gemessen worden.

Wird nun die *Jeffrey'sche* Temperaturkurve, wie es in der Figur 29 geschehen ist, einmal von der Oberfläche des Festlandes und das andere Mal von der Meeresoberfläche aus nach unten aufgetragen, so ergibt sich der Schnittpunkt mit der von v. Wolff (53) aufgestellten Schmelzkurve eines bestimmten Tiefengesteines unter dem Meere erheblich tiefer als unter dem Festlande. Die kristallinen Schichten sind also unter den Ozeanen dicker als unter den Kontinenten, so dass sich das Phänomen der gleichen Schwere auf dem Festlande und auf dem Meere zum teil hierdurch erklären lässt.

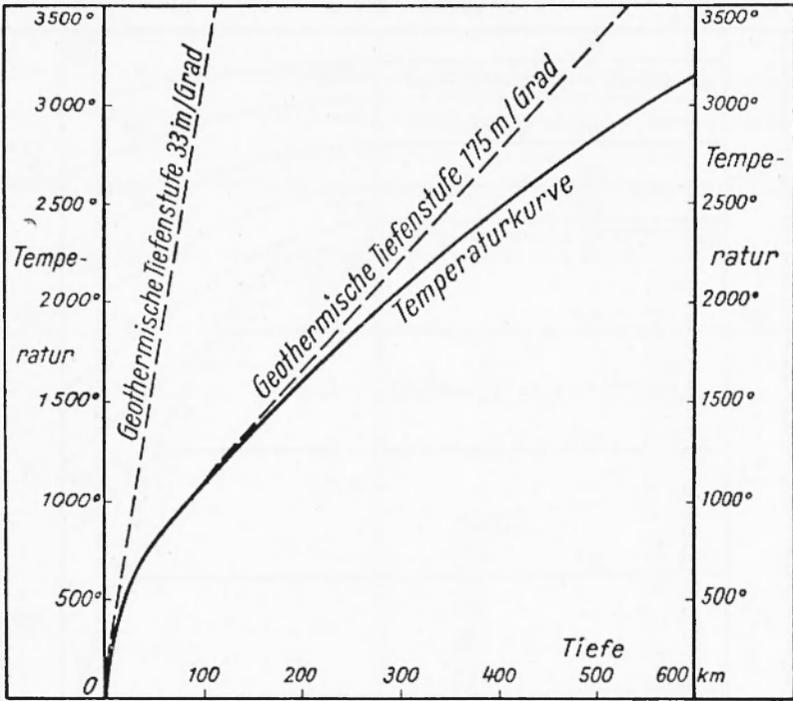
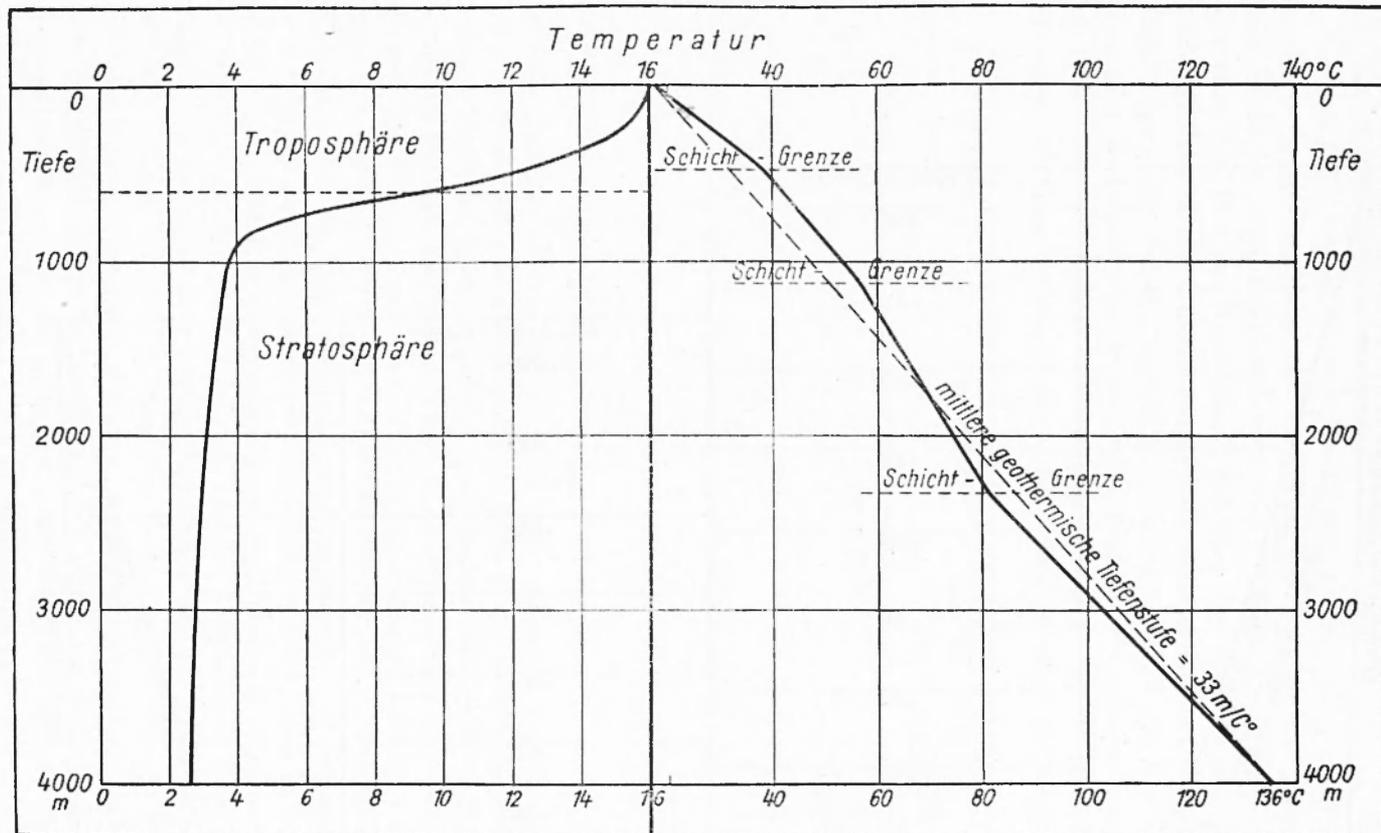


Fig. 27 - Zunahme der Temperatur im Erdinnern, nach *Jeffreys* und geothermische Tiefenstufen.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in den Alpentunneln lassen den Schluss zu, dass im Meeresniveau unter dem Gebirge ein Temperaturunterschied gegenüber dem gleichen Niveau des Festlandes von etwa $+100^{\circ}$ besteht. Infolgedessen liegt natürlich auch die plastische Zwischenschicht unter den Alpen höher als unter ihren Flanken. Nach Berechnungen von *Rosenbach* (⁵⁴) erzeugt die im Profil der Figur 30 dargestellte Verdickung der plastischen Schicht genau die aus den Schwermessungen abgeleiteten negativen Bouguer-Anomalien.

Die « Aufwölbung » der plastischen Schicht ist natürlich keine « Antiklinale » im gewöhnlichen geologischen Sinne, sondern nur eine Folge der durch die Pfeile in der Figur 30 angedeuteten Expansion von plastisch gewordenem Kristallin. Eine solche Volumenvermehrung wirkt sich besonders stark nach oben aus, weil eine Expansion nach unten überhaupt nicht und nach den Seiten hin nur in sehr beschränk-



28 - Temperatur-Abnahme unter der Meeresoberfläche nach Defant und Zunahme unter der Oberfläche des Festlandes (schematisch).

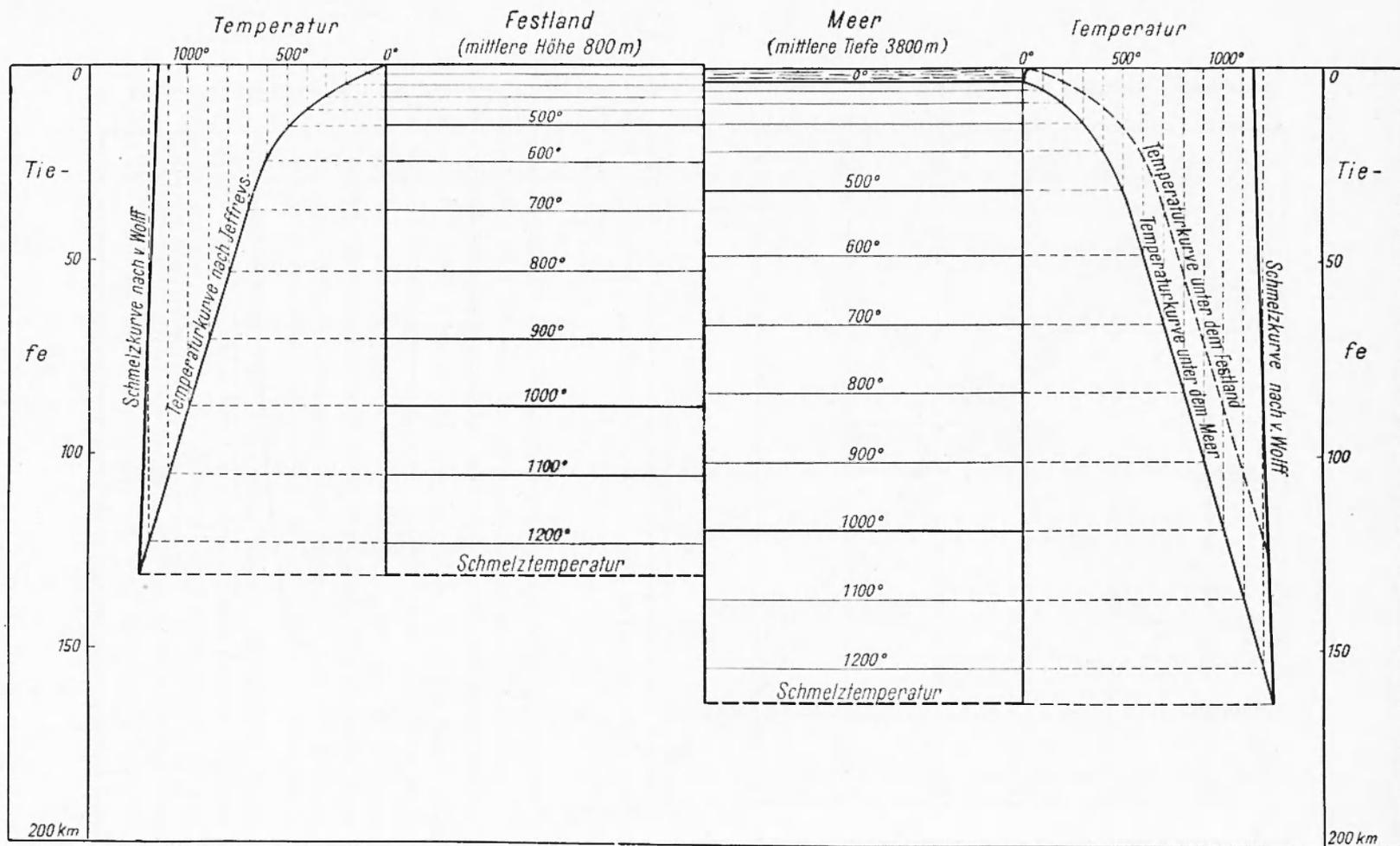


Fig. 29 - Geothermisches Profil durch die Erdkruste unter Festland und Meer sowie Temperaturkurve von Jeffreys und Schmelzkurve von v. Wolff.

tem Masse möglich ist. Die Gehirgszüge verraten demnach Verdickungen der plastischen Zwischenschicht.

Bischof (⁵⁵), damals Professor der Chemie an der Universität Bonn, zeichnete bereits im Jahre 1838 die Oberfläche des Magmas parallel zum Profil der festen Erdoberfläche. *Deely* (⁵⁶) bemerkt bei Erwägungen über den Bau des Kanadischen Schildes, dass Kompression und Faltung allein für die Gebirgsbildung nicht ausreichend sind, in erster Linie komme die Hebung infolge Ausdehnung hohe Temperatur aufweisender Tiefenschichten in Betracht. *Hopkins* (⁵⁷) schrieb bereits im Jahre 1836: « I suppose this elevatory force, whatever be its origin act upon the lower surface of the uplifted mass through the medium

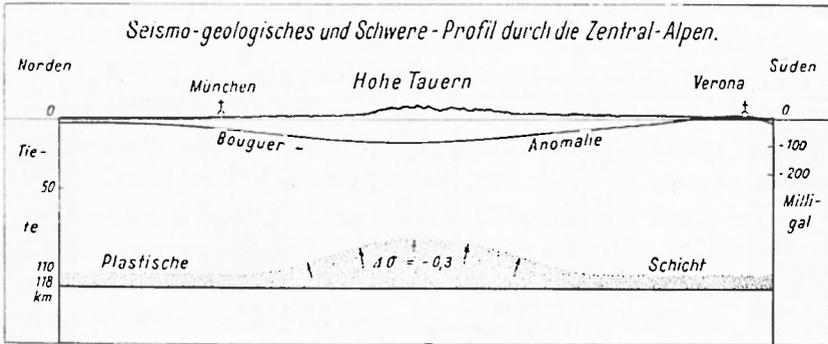


Fig. 30.

of some fluid, which may be conceived to be an elastic vapour or in other cases a matter in a state of fusion from heat». *Reid* (⁵⁸), seinerzeit Professor der Geologie an der John Hopkins University in Baltimore, der auch als Seismologe bekannt geworden ist und an den Congressen der International Association of Seismologists teilnahm, äusserte sich zur Frage der Isostasie mit folgenden Worten: « The theory of isostasy tells us, quite definitely, that the elevation of mountains or the depression of the oceans must be due to vertical forces brought about by a decrease or increase of the material under these regions ».

Clarence Edward Dutton (⁵⁹), der für den Lastenausgleich in der Erde das Wort « Isostasy » geprägt hat, führte am 27. April 1889 in seinem Vortrage vor der Philosophical Society of Washington aus: « Whatever may have been the cause of the great regional uplifts, it in no manner, affects the law of isostasy. What the real nature of the uplifting force may be is, to my mind, an entire mystery; but,

I think we may discern at least one of its attribute, and that is a gradual expansion or diminuation of the density of the subterranean magmas. If the isostatic force is operative at all, this expansion is a rigorous consequence, for whenever a rise of the land has taken place on of two things has happened: the region affected has either gained an acesion of mass or a mere increase of volume without increase of mass. Hence, I infer, that the cause which elevates the land involves an expansion of the underlying magmas, and the cause which depresses it is a shrinkage of the magmas. The nature of the process is, at present, a complete mystery ».

Wie das Profil durch Kontinente und Ozeane in der Figur 31

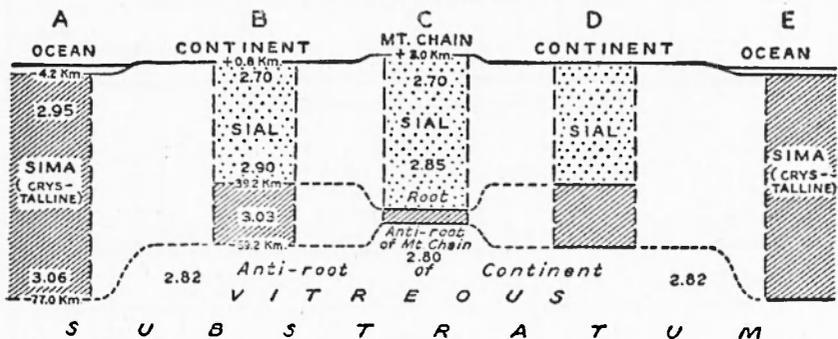


Fig. 31 - Geologisches Profil durch Continente und Ozeane nach Daly.

zeigt, entsprechen die Ergebnisse der in dieser Abhandlung geschilderten Untersuchungen des Verfassers der bereits im Jahre 1938 in dem berühmten Buche « Architecture of the Earth » des Geologie-Professors an der Harvard-Universität, R.A. Daly, vertretenen Ansicht: *Wurzel (root) unter dem Meere, Gegenwurzel (anti-root) unter dem Festland, insbesondere auch unter den Gebirgen.* Diese Aussage ist das Gegenteil von dem, was zahlreiche Geologen und Geophysiker bisher angenommen haben.

Wie die Seismik bewiesen hat, dass die Hypothese von Airy unhaltbar ist und die Gebirge keine Wurzel haben, so ist sie auch in der Lage, die Verdickungen der plastischen Zwischenschicht zu bestimmen und damit die Voraussetzung für eine hypothesenfreie isostatische Schwere-Reduction zu schaffen. Das *maßstäbliche* Profil in

der Figur 32, in dem der 5 km tiefe Pazific und die 4 km hohen Rocky Mountains nur durch kleine, kaum sichtbare Verdickungen der die Erdoberfläche darstellenden Linie zum Ausdruck kommen, zeigt, dass es sich nur um eine Aufgabe der Sprengseismik handeln kann. Bei dem heutigen Stande der experimentellen Seismik wird die Lö-



Fig. 32. - Masstabliches Profil durch die Rocky Mountains und den östlichen Pazific mit plastischen Schichten im tiefen Untergrunde.

sung des Problems nicht auf unüberwindliche Schwierigkeiten stossen, zumal die 8- und 11 km/sec-Schichten, wie aus den Profilen der Figuren 12 und 14 sowie den Beobachtungen von *Angenheister* an pazifischen Erdbeben hervorgeht, geschlossene Gürtel um die Erde bilden und deshalb als seismische Leithorizonte benutzt werden können.

Es wäre für die im September 1950 unter italienischer Führung in Verona gegründete « Organisation Séismologique Européenne » und die vor kurzem auf holländische Anregung hin im Haag ins Leben gerufene « European Association of Exploration Geophysicists » eine wissenschaftlich und praktisch gleich lohnende Aufgabe, die Dicke der plastischen Zwischenschicht im Alpengebiet sprengseismisch zu ermitteln. Mit der Lösung dieser Aufgabe würde dem 200-jährigen Rätselraten um die Ursache des Massendefizits unter den Hochgebirgen ein Ende gemacht werden. Da die Geologie in aller Welt ein grosses Interesse an der Lösung des Problems der Gebirgsbildung hat, werden die Staaten gern bereit sein, die für die Durchführung der sprengseismischen Untersuchungen erforderlichen Mittel zur Verfügung zu stellen.

ZUSAMMENFASSUNG

De Ergebnisse der Untersuchungen sind folgende:

1) *Die Schwimmhypothese von Airy, wie sie von vielen späteren Autoren verstanden worden ist, verträgt sich nicht mit seismischen Beobachtungsergebnissen. Die Sierra Nevada und die Alpen haben keine Wurzel (root), es sind vielmehr Anzeichen einer Gegenwurzel vorhanden.*

2) *Die Einknickungstheorie (buckling-hypothesis) von Vening-*

Meinesz ist nicht haltbar und zur Erklärung der Streifen negativer Schwere-Anomalien im Indischen Archipel auch nicht erforderlich.

3) Bei der seismisch festgestellten Schichtung der Erdkruste und des Erdmantels sind die von zahlreichen Autoren, wie Griggs, Holmes, Pekeris, Vening-Meinesz und anderen unter der Voraussetzung eines nicht geschichteten Erdmantels theoretisch behandelten Strömungen (*convection-theory*) nicht möglich.

4) Die Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche, insbesondere auch die Heraushebung der Gebirge, wird in Übereinstimmung mit den Ansichten von Boscovich (1755), Hopkins (1836), Bischof (1838), Reade (1886), Dutton (1889), Deely (1910), Reid (1911), Tromp (1937) und anderen Autoren durch geothermisch bedingte Volumen-Änderungen von Tiefenschichten erklärt.

5) Die kristalline Erdkruste ist unter den Meeren dicker als unter dem Festlande (*roots und anti-roots* von Daly 1938).

6) Es sind sprengseismische Untersuchungen erforderlich zur Ermittlung der Dicken der plastischen Tiefenschichten unter dem flachen Lande und unter den Gebirgen.

SUMMARY

The results of the investigations are the following:

1) *The swim-hypothesis of Airy, as conceived by many authors, is not in accordance with seismic observations. The Sierra Nevada and The Alps have no root, but there are indications of anti-roots under the mountains.*

2) *The buckling-hypothesis of Vening-Meinesz cannot be maintained and is not necessary for the explanation of the stripes of negative gravity-anomalies in the Indian Archipel.*

3) *In view of the fact that the earth's crust and mantel, according to seismic studies, show a pronounced stratification, the convection-theory of Griggs, Holmes, Pekeris, Vening-Meinesz and other authors cannot be maintained.*

4) *The elevations and depressions of the surface of the earth, especially the uprise of the countains are explained by geothermically caused variations of the volume of deep seated materials. This view is accordance with the opinion of Boscovich (1755), Hopkins (1836), Bischof (1838), Read (1886), Dutton (1889), Deely (1910), Reid (1911), Tromp (1937) and other authors.*

5) *The crystalline crust of the earth is thicker under the oceans than under the continents (roots and anti-roots of Daly, 1938).*

6) *In order to determine the thickness of the plastic layers within the earth's crust seismic experiments with artificial earth-quakes (blastings) should be made within, and outside of, the mountain-ranges.*

BIBLIOGRAFIA

(1) HEISKANEN W.: *Catalogue of the isostatically reduced gravity stations*. Ann. Acad. Scientiarum Fennicae. Ser. A. Tom. LI, N. 10, Helsinki 1939.

(2) MORELLI C.: *La rete geofisica e geodetica in Italia nel suo stato attuale e nei suoi rapporti con la struttura geologica superficiale e profonda*. Pubblicazione N. 121 dell'Istituto Nazionale di Geofisica. Trieste 1946, p. 1-77.

(3) PRATT J. H.: *On the attraction of the Himalaya Mountains and of the elevated regions beyond them upon the plumb-line in India*. Phil. Trans. Royal Soc. London, vol. 145, p. 51, 1855.

(4) AIRY G. B.: *On the computation of the effect of the attraction of mountain masses as disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys*. Phil. Tran. Royal Soc. London, vol. 115, p. 101, 1855.

(5) NIETHAMMER TH.: *Die Schwerebestimmungen der schweizerischen geodätischen Commission und ihre Ergebnisse*. Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Schaffhausen, 1921.

(6) HAYFORD J. F.: *The figure of the Earth and isostasy from measurements in the United States*. Washington 1909, p. 1-176.

(7) PRATT J. H.: *On the deflection of the plumb-line in India, caused by the attraction of the Himalaya Mountains and of the elevated regions beyond, and its modification by the compensating effect of a deficiency of matter below the mountain mass*. Phil. Trans. Royal Soc. London, vol. 149, p. 745-778, 1859.

(8) SALONEN E.: *Über die Erdkrustendicke und die isostatische Compensation der Schweizer Alpen*. Ann. Acad. Scientiarum Fennicae. Ser. A., Tome XXXVII, Helsinki 1933, p. 1-27.

(9) HEISKANEN W.: *Untersuchungen über Schwerkraft und Isostasie*. Suomen Geodetissen Laikoksen Julkaisuja, N. 4, p. 1-96, Helsinki 1924.

(10) HOLOPAINEN P. E.: *On the gravity field and the isostatic structure of the Earth's crust in the East Alps*. Ann. Acad. Scientiarum Fennicae. Ser. A. III. Geologica-Geographica 12, p. 1-94, Helsinki 1947.

(11) GUTENBERG B.: *Seismological evidence for roots of mountains*. Bull. Geol. Soc. America, vol. 54, p. 473-498, 1943.

(12) WANNER E.: *Über den Tiefgang der Alpenfaltung*. Eclogae Geologicae Helvetiae, vol. 41, p. 125-134, 1948.

(13) CALOI P.: *Ricerche su terremoti ad origine vicina. Scosse del Consiglio dell'Ottobre 1936-XII*. Pubblicazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche. N. 7, p. 1-41, Roma 1946-48.

(14) —: *Caratteristiche sismiche dell'Appennino toscano-romagnolo*. Pubblicazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche. N. 36, p. 1-15, Roma 1948-50.

(15) DI FILIPPO D. - MARCELLI L.: *Uno studio sul terremoto del Gran Sasso d'Italia del 5 settembre 1950*. Annali di Geofisica, vol. IV, N. 2, aprile 1951, p. 213-239.

(16) —: *Tempi di tragitto delle onde P* e spessore dello strato del granito nell'Italia Centrale*. Annali di Geofisica, vol. IV, N. 4, ottobre 1951, p. 579-589.

(17) ROSINI E.: *Il terremoto della Garfagna del 15 ottobre 1939-XVII*. Pubblicazioni dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche, N. 44, p. 1-24, Roma 1948.

(18) VALLE P. E.: *Contributo allo studio delle caratteristiche sismiche del Mediterraneo centro-orientale*. Pubblicazioni dell'Istituto Nazionale di Geofisica del Consiglio Nazionale delle Ricerche, N. 140, p. 1-16, Roma 1948.

(19) BYERLY P.: *The first preliminary waves of the Nevada Earthquake of December 20, 1932*. Bull. Seism. Soc. America, vol. 25, N. 1, January 1935, p. 62-80.

(20) —: *The Sierra Nevada in the light of isostasy (discussion)*. Bull. Geol. Soc. America, vol. 48, 1937, p. 2025-2031.

(21) —: *Near Earthquakes in Central California*. Bull. Seism. Soc. America, vol. 29, N. 3, July 1939, p. 427-462.

(22) MINTROP L.: *Die Gliederung der Erdrinde und des Erdmantels nach seismischen Beobachtungen*. Nachrichten Ges. Wiss. Göttingen, math.-phys. Klasse 1947.

(23) —: *On the stratification of the Earth's crust according to seismic studies of a large explosion and of earthquakes*. Geophysics, vol. XIV, N. 3, July 1949, p. 321-336.

(24) ANGENHEISTER G.: *Discussionsbemerkung*. Comptes Rendus XVI^e Session Congrès Géologique International, 1926, p. 1507, Madrid 1928.

(25) STONELEY R.: *Some new earthquakes reported in the International Seismological Summary*. Monthly Notices, Geophysical Supplement, January 1931.

(26) WIECHERT E.: *Über die Massenverteilung im Innern der Erde*. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, math.-phys. Klasse 1897, Heft 3, p. 221-243.

(27) DALY R. A.: *Architecture of the Earth*. New York & London 1938, p. 1-201.

(28) —: *Strength and Structure of the Earth*. New York 1940, p. 1-434.

(29) MOHOROVICIC ST.: *Das Erdinnere*. Zeitschr. für Angewandte Geophysik, Band 1, Heft 2, 1925, p. 330.

(30) DÖLLER C.: *Zur Physik des Vulkanismus*. Sitzungsberichte Wiener Acad. Wiss. mathem.-naturw. Klasse, vol. CXII, Abt. 1, 1903, p. 681.

(31) HELMERT F. R.: *Die Tiefe der Ausgleichsfläche bei der Pratt'schen Hypothese für das Gleichgewicht der Erdkruste und der Verlauf der Schwerestörung vom Innern der Kontinente und Ozeane nach den Küsten*. Sitzungsberichte Acad. Wiss. Berlin 1909, vol. XLVIII, p. 1192-1198.

(32) BORN A.: *Schweremessungen und Isostasie*. Berlin 1923. 160 Seiten, 31 figure.

(33) GUTENBERG B.: *Variations in physical properties within the Earth's crustal layers*. Am. Journ. Science, 243 A, Daly volume 1945, p. 312.

(34) BENNDORF H.: *Über die Art der Fortpflanzung der Erdbebenwellen im*

Erdinnern. Mitt. Erdbebencommission Acad. Wiss. Wien, Neue Folge N. XXIX, 1905.

(35) ANENHEISTER G.: *Beobachtungen an pazifischen Beben*. Nachrichten Ges. Wiss. Göttingen, math.-phys. Klasse 1921.

(36) WIECHERT E.: *Untersuchungen der Erdrinde mit Hilfe von Sprengungen*. Geol. Rundschau, vol. XVII, Heft 5, 1926, p. 339-346.

(37) KRUMBHACH G.: *Über die Laufzeiten der Vorläufer- und Wechselwellen bei Erdbeben in ihrer Beziehung zur Schichtung der Erdrinde*. Veröff. Reichsanstalt für Erdbebenforschung, Jena 1926, Heft 5.

(38) SCHWEYDAR W.: *Über Isostasie*. Zeitschr. für Geophysik, II. Jahrgang 1926, Heft 4, p. 145-150.

(39) VENING-MEINESZ F. A.: *The mechanism of mountain formation in geosyncline belts*. Proceed. Akad. Wetenschappen, vol. 34, 4, Amsterdam 1933.

(40) —: *Gravimetric results in the Dutch East Indies in connection with mountain folding processes*. Bull. Geol. Soc. American. vol. 43.

(41) —: *Ergebnisse der Schwerkraftbeobachtungen auf dem Meere in den Jahren 1923-1932*. Ergebnisse der kosmischen Physik, vol. 2, N. 3, 1933.

(42) GERTH H.: *Antillen, Molluken, zwei Inselbogen*. Ein Vergleich des geologischen Baues und der Schwere-Anomalien. Geol. Rundschau, vol. 39, 1951, Heft 1, p. 273-284.

(43) KUENEN PH., P. *The negative isostatic anomalies in the East Indies* (with experiments). Leidsche Geol. Med. dl. 8, afl. 2, 1936, p. 169-224.

(44) GRIGGS D.: *A theory of mountain building*. American Journ. Science, September 1939, p. 611-650.

(45) TROMP S. W.: *On the mechanism of the geological undulation phenomenon in general and of folding in particular and their application to the problem of the roots of mountains theory*. Leiden 1937, p. 1-184.

(46) VENING-MEINESZ: *Convection currents in the Earth*. Proceed. Ned. Akad. v. Wetensch. Ib, 50, 3.

(47) PP. MAIRE & BOSCOVICH: *Voyage astronomique et géographique dans l'État de l'Eglise*. Traduit du Latin. Paris 1770. Livre cinquième Recherches sur la figure de la Terre, déterminé par les lois de l'équilibre, et par la mesure des degrés, p. 364-500.

(48) BARRAGE C.: *Observations on the Temple of Serapis. at Pozzuoli, near Naples, with remarks on certain causes which may produce Geological Cycles of great extent*. Quaterly Journ. Geol. Soc. Vol. III, 1847, p. 186-217.

(49) READE T. M.: *The origin of mountain ranges, considered experimentally, structurally and dynamically*. London 1886. 359 pages, 42 plates.

(50) ORSTRAND C. E.: *Some possible application of geothermic to geology*. Bull. American Association Petroleum Geologists, vol. 18, N. 1, January 1934, p. 13-38.

(51) JEFFREYS H.: *The Earth, its origin, history and physical conditions*. Cambridge 1929, p. 154.

(52) FESTA C. e. SANTANGELO M.: *La radioattività della Terra*. Annali di Geofisica, vol. I, 1948, p. 581-609.

(53) VON WOLFF F.: *Stoff und Zustand im Innern der Erde*. Nova Acta Leopoldina. Neue Folge, vol. 12, N. 87, p. 383-402.

- (54) ROSENBACH O.: *Theoretische Untersuchungen zum Problem der Isostasie*. Geofisica pura e applicata. Vol. 22, Fasc. 1-2, 1952.
- (55) BISCHOF G.: *On the natural history of volcanos and earthquakes*. Edinburgh New Phil. Journ. October 1838-January 1839, vol. 51-52, p. 25-81.
- (56) DEELY R. M.: *Gebirgsbildung durch Hebung tiefer Schichten mit hoher Temperatur*. Geol. Magazine, vol. VII, 1910, p. 501-503.
- (57) HOPKINS W.: *Researches in physical geology*. Trans. Cambridge Phil. Soc., vol. VI, part I, 1836, p. 1-84.
- (58) REID H. F.: *Isostasy and Mountain Ranges*. Proceed. American Phil. Soc., vol. I, 1911, p. 444-451.
- (59) DUTTON CL. E.: *On some of the greater problems of physical geology*. Bull. Phil. Soc. of Washington. Vol. XI, p. 51-64. Read before the society, April 27, 1889.