

BESZÁMOLÓ  
A M. KIR. FÖLDTANI INTÉZET  
VITAÜLÉSEINEK  
MUNKÁLATAIRÓL

A M. KIR. FÖLDTANI INTÉZET  
1941. ÉVI JELENTÉSÉNEK FÜGGELÉKE

3. FÜZET.



BUDAPEST, 1941.

Felelős kiadó : lóczi Lóczy Lajos dr.

Mátravölgyi-nyomda Budapest, V., Vécsey-utca 3.

# BESZÁMOLÓ A M. KIR. FÖLDTANI INTÉZET VITAÜLÉSEINEK MUNKÁLATAIRÓL.\*

## 1. SZAKÜLÉS

1941. január hó 27.-én d. u. 5 órakor.\*\*

### T á r g y :

V. A. Heiskanen: Das isostatische Gleichgewicht der Erdkruste.

Megjelentek: Babarczy József, Bacsák György, Balogh Kálmán, Bartkó Lajos, Böhm-Ben Boleslaw, Bogsch László, Buday György, Csajághy Gábor, Duchon Béla, Ébényi Gyula, Egyed László, Endrédy Endre, Facsinay László, Faix Béla, Földvári Aladár, Gaál István, Gömör-Laiml László, Hampel Ferenc, Han Ferenc, vitéz Hatalay László, Hegedüs Gyula, Heiskanen V. A., Horwitzky Ferenc, Jugovics Lajos, Keledi Ferenc, Kerekes József, Lesenczey Ernő, Liffa Aurél, Lóczy Lajos, Majzon László, H. Martola, Marzsó Lajos, Méhes Kálmán, Morvai Mihály, ifj. Noszky Jenő, Oltay Andrea, Oltay Károly, Oltay Károlyné, Pantó Gábor, vitéz Papp Gyula, Papp Károlyné-Balogh Margit, Papp Simon, Papp Simonné, Pávai Vajna Ferenc, Rédey László, Regőczy Emil, Schneider Béla, Schréter Zoltán, Sik Károly, Strausz László, Szalai Tibor, Szebényi Lajos, Szelényi Tibor, Szentés Ferenc, Szent Iványi György, vitéz Szovátai György, Szolnoki Imre, Szőke Béla, Tarics Sándor, Teőreök László, Varga Sarolta, Vigh Gyula, Vogl Mária, Wein György, Witkowsky Endre, Zsivny Viktor.

Elnöklő **Lóczy Lajos** egyetemi ny. r. tanár, igazgató az ülést megnyitja, üdvözlí a szép számban megjelenteket.

Szaküléseinken nemcsak saját kutatásaink legfrissebb eredményeit vitatjuk meg, hanem foglalkozunk az általános geológiai problémákkal is. Mai rendkívüli ülésünkön igen tisztelt vendégünk Dr. Heiskanen helsinki

---

\* A m. kir. Földtani Intézet 1941. Évi Jelentésének Függetléke.

\*\* Minthogy az előadás szövege 1941. április 1.-én érkezett meg Finnországból, azt most utólagosan tesszük közzé.

műegyetemi tanár úr fog a Földkéreg izosztatikussal egyensúlyára vonatkozó tanulmányairól beszámolni. Heiskanen professzor a helsinki műegyetemen a geodéziát adja elő. Neve a nemzetközi tudományos életben az izosztáziára vonatkozó alapos és részletes tanulmányai révén vált ismertté. Kiváló tudományos működéséért az Union International Geodesique et Geophysique avval tüntette ki, hogy őt az Union által életre hívott »L'Institute Isostatique« vezetésével bízta meg. Ez az intézet Heiskanen tanulmányai alapján létesült és az elmúlt 5 év alatt számottevő eredményeket ért el.

Sehr geehrter Herr Professor! Es ist uns eine ganz besondere Freude, Sie in unserem Kreise begrüßen zu können. Ich danke Ihnen herzlichst, dass Sie trotz der jetzigen schweren Umständen und vor allem bei den jetzt herrschenden Reiseschwierigkeiten von dem fernliegenden, nördlichen Bruderlande, aus Finnland, zu uns kamen, um uns über Ihre wertvollen Studien bezüglich des isostatischen Gleichgewichtes der Erdkruste zu referieren. Die Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Forschung und der geistige Austausch unter den Nationen darf auch heute nicht unterbrochen oder gar zum Stillstand verurteilt werden. Insbesondere zwischen uns Bruderstaaten, Finnland und Ungarn soll die unmittelbare, wissenschaftliche Verbindung auch jetzt Aufrecht erhalten bleiben. Eben aus diesem Grunde schätzen wir Ihren Besuch, lieber Herr Kollege, besonders hoch ein. Ich möchte Sie nun bitten Ihren Vortrag zu halten. Somit übergebe ich das Wort Herrn Professor Heiskanen.



V. A. HEISKANEN :

### DAS ISOSTATISCHE GLEICHGEWICHT DER ERDKRUSTE.

Ein Astronom kann ziemlich genau sagen, in welchem Zustand ein Stern sich befindet. Er weiss die Masse, die Dichte, den Ionisationsgrad und die Temperatur der Oberflächenschichten des Sternes. Und es ist gleichgültig, ob der Stern 10 oder 100 oder 1000 Lichtjahre weit von uns ist. Die allwissenden Lichtstrahlen bringen nämlich uns genau Kenntnisse über die Sterne. Dem Wissenschaftler bleibt es nur übrig, die mystischen Nachrichten des Lichtstrahles zu lesen.

In einer ebenso günstigen Lage ist nicht der Wissenschaftler, der es zur Aufgabe hat, die innere Struktur der Erde zu untersuchen. Von Erdinnern kommen keine allwissenden Lichtstrahlen, und die Nachrichten, die wir mit Hilfe der seismischen Wellen bekommen, können auf mehrere Weisen interpretiert werden. Da es sich dem so verhält, müssen wir einen Umweg machen und uns vermittels einiger indirekten Methoden Kenntnis von den Ereignissen der Erdkruste verschaffen. Die besten Methoden zur Untersuchung der Erdkruste sind, ausser den schon erwähnten seismologischen Methoden, die geodätischen und die gravimetrischen. D. h. wir versuchen die Struktur der Erdkruste mit Hilfe der *Lotabweichungen* und der *Schwereanomalien* zu untersuchen.

Die Lotabweichung, worunter wir den Winkel Zwischen der Geoidnormalen und der Ellipsoidnormale verstehen, hängt sowohl von dem angewandten Erdellipsoid als auch von der Form des Geoids ab. Benutzen wir ein zu grosses oder zu kleines Referenzellipsoid, so werden wir Lotabweichungen bekommen, die nicht reel sind, sondern von dem unrichtigen Ellipsoid vorgetäuscht worden sind. Diese Lotabweichungen sind systematisch und wachsen

linear vom Ausgangspunkte aus (Fig. 1.). Werden wir diese systematischen Lotabweichungen durch Verbesserung des angewandten Ellipsoids beseitigen, so bleibt der *reelle Teil* übrig, der von den Unregelmässigkeiten der Form des Geoids abhängig ist. Und diese Unregelmässigkeiten des Geoids werden durch die Störungsmassen der Erdkruste hervorgebracht. Die *Lotabweichungen* sind gewöhn-

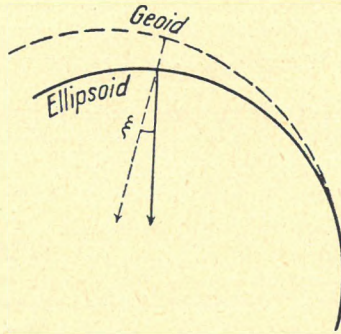


Fig. 1.

**Durch ein unrichtiges Referenzellipsoid werden systematische unreelle Lotabweichungen vorgetäuscht.**

lich in Gebirgsgegenden erheblich geringer, als was die sichtbaren Massenunregelmässigkeiten, wie Gebirge, Täler, Ozeane und Inseln voraussetzen. Dieses kann kaum von etwas anderem abhängen als davon, dass die Attraktion der Bergmassen durch die geringere Dichte der Erdkruste wenigstens zum Teil kompensiert wird. Auf diese Weise gelangen wir zur Idee vom isostatischen Gleichgewicht der Erdkruste.

Zu demselben Resultat führen uns auch *die Schwereanomalien*, die durchaus anders sind, als was die Annahme davon, dass die Gebirge absolute Massenüberschussgebiete wären, voraussetzt. Werden wir die beobachteten Schwerewerte vom Beobachtungspunkt zur Meeresfläche auf solche Weise reduzieren, dass man die *oberhalb der Meeresfläche liegenden Massen wegdenkt*, und diese reduzierten Werte mit den theoretischen, mit Hilfe der Schwereformel abgeleiteten Werten vergleichen, so bekommen wir sog. *Bouquersche Anomalien*, die nahe Null liegen sollten, wenn diese sichtbaren Mas-

sen absolute Massenüberschüsse wären. Aber in der Tat bekommt man beinahe überall in den Gebirgsgegenden, wie in den Alpen, in Norwegen, in den Rocky Mountains usw. systematische stark negative Anomalien, die bis  $-200$  milligal ( $1 \text{ milligal} = 0.001 \text{ cm sec}^2$ ) steigen können. Kümmern wir uns aber um diese oberhalb der Meeresfläche liegenden Massen gar nicht, so bekommen wir die sog. *Freiluftanomalien*, die wieder gewöhnlich in den Gebirgsgegenden etwas positiv sind. Wenn wir aber diese Massen nicht ganz und gar wegdenken werden, sondern sie in die Erdkruste zwischen der Geoidfläche und der Kompensationsfläche streuen, wie man in den isostatischen Reduktionen tut, so bekommt man die sog. isostatischen Anomalien, die schon ziemlich klein sind, wie die folgende Tabelle zeigt:

Tabelle I.

## Schwereanomalien Mittelwerte in mgal

Untersuchungs-gebiet	Bouguersche Anomalien	Isostatische Anomalien
Kaukasus . . . . .	- 97	+ 28
Armenien . . . . .	- 100	+ 46
Alpen . . . . .	- 108	+ 10
Nördlich von den Alpen . .	- 56	+ 16
Norwegen . . . . .	- 23	+ 5
Rocky Mountains . . . . .	- 101	+ 2
Zentral-Asien . . . . .	- 240	- 55
West Indien . . . . .	c. + 200	+ 15
Ozeanen . . . . .	- 250 till - 400	+ 20 till + 40

Diese Tatsache zeigt uns unzweideutig, dass die sichtbaren Massenunregelmässigkeiten in der Erdkruste im grössen und ganzen isostatisch kompensiert sind. Noch besser wird dieses einleuchten, wenn man bedenkt, dass die Schwerkraft auch auf den Ozeanen beinahe gleich gross ist wie auf dem entsprechenden Breitengrad im Kontinent, obgleich die Dichte des Meer-Wassers nur etwas mehr als 1 ist, während die Dichte der Erdkruste ca. 2.7 beträgt. Wenn es unter dem Ozeanboden nicht mehr Masse sich befände als unter dem Kontinent in der entsprechenden Tiefe, so müsste die Schwerkraft auf den Ozeanen um etwa 400 milligal

geringer sein als im Kontinent. In Wirklichkeit ist die Schwerkraft auf den Ozeanen etwas grösser als auf dem Kontinent.

Heutzutage kann man kaum an der Isostasielehre zweifeln. Wir müssen sie als ein absolut festgestelltes Prinzip betrachten. Heutzutage ist es nur wichtig zu untersuchen, wie in Einzelheiten das isostatische Gleichgewicht zustande gekommen ist, wie tief die Kompensationsfläche sich befindet oder wie gross die Erdkrustendicke ist.

Nach *Pratt*, *Hayford* und *Bowie* sind die Gebirgsmassen von ihrem Untergrund aufgestiegen wie ein Teig, dessen Dichte um so geringer wird, je höher er steigt (Fig. 2.). Nach dieser Auffassung

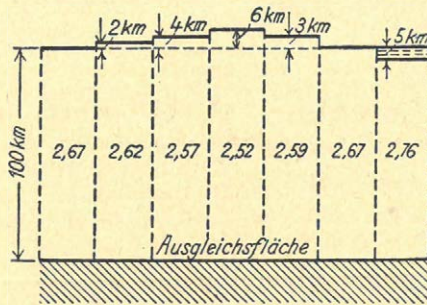


Fig. 2.

#### Isostatische Kompensation nach Pratt-Hayford (schematisch).

sind Gebirgsmassen und Kontinentalblöcke keine absolute Massenüberschüsse. Und der Massendefekt, der durch die Wassermasse der Ozeane hervorgebracht wird, wird dadurch kompensiert, dass das Material unter den Ozeanen eine grössere Dichte als unter den Kontinentalblöcken hat. In einer gewissen Tiefe, in der sog. *Ausgleichsfläche*, sind schon alle Massenunregelmässigkeiten kompensiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ausgleichstiefe etwa 100 km beträgt.

Nach der Auffassung von *Airy*, die später von mir näher präzisiert worden ist, schwimmen die Gebirgsketten und Kontinentalblöcke in der unterliegenden Magmaschicht gewissermassen wie Holzflotte oder ein Eisberg im Meere (Fig. 3.) die um so tiefer ins Meer einsinken, je höher sie sind. *Dies alles darf man doch nicht buchstäblich verstehen*. Wir dürfen nicht annehmen,



dass unter der festen Erdkruste eine fließende magma-artige Schicht vorhanden wäre. So etwas gibt es dort sicher nicht. Im Gegenteil zeigen die seismischen Wellen, die Ebbe- und Fluterscheinung und die Polbewegung, dass die Erde in der Tat fester ist als der Stahl. Aber unter dem jahrtausendelangen Druck der obenliegenden Gebirgsmassen wird diese Unterschicht allmählig plastisch oder, wie man sagt, *säkulär fließend*. Gegen die kurzperiodischen Kräfte verhalten sich die unter der Erdkruste liegenden Schichten wie ein absolut fester und elastischer Körper, aber unter dem Druck von

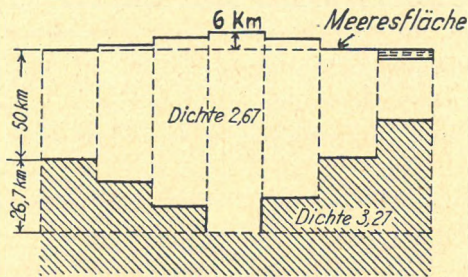


Fig. 3.

### Isostatische Kompensation nach Airy-Heiskanen (schematisch).

Kräften, die geologische Zeiten wirksam sind, verhalten sie sich wie eine langsam fließende Flüssigkeit, sie fließen.

Ein gutes Beispiel davon ist die postglaziale Landerhebung von Fennoskandien. Unter der Eiszeit sank die Erdkruste unter dem Druck der Eismasse in die unterliegende tiefere Simaschicht und schob das Simamaterial in horizontaler Richtung weg. Nach der Eiszeit begann die Erdoberfläche sich zu erheben und zum isostatischen Gleichgewicht zu streben. Die Erdoberfläche hat sich laut einer Untersuchung von *Niskanen* schon vor dem Ende der Eiszeit 250 Meter und nach dem Ende der Eiszeit etwa 260 Meter erhoben und hat noch etwa 210 Meter zu steigen, bevor sie sich im isostatischen Gleichgewicht befindet.

Wir verstehen leicht, dass die sichtbaren Massen auch durch die Auffassungsart von *Airy* kompensiert werden und zwar so, dass die positiven Massen der Gebirge in dem untersten Teil der

Erdkruste und die negative Masse der Ozeane im obersten Teil der Simaschicht kompensiert werden.

Die meisten Forscher sind der Meinung, dass die Airysche isostatische Auffassung der Wirklichkeit näher liegt als die Prattische. Aus diesem Grunde ist es wichtig, das Airysche isostatische System näher zu untersuchen. Nehmen wir an, dass der Dichtenunterschied zwischen der *Unterschicht* und der *Erdkruste* 0.6 sei, so sind die Wurzeln der Gebirgsmassen 4.5 mal grösser als deren Höhe und die »Antiwurzeln« der Ozeane etwa 2.8 mal grösser als die Tiefe des Meeres. Die untere Fläche der Erdkruste ist somit auf den Kontinenten so zu sagen ein *4.5 mal übertriebenes Spiegelbild der Topographie* der Erde und unterhalb der Weltmeere ein *2.8 mal übertriebenes Spiegelbild der Tiefe der Meere*. Nehmen wir an, dass die normale Mächtigkeit z. B. 40 km beträgt, so ist die Dicke der Erdkruste unter einem 2 km hohen Gebirge  $2 + 40 + 9 = 51$  km und unterhalb eines 5 km tiefen Meeres  $40 - 5 - 14 = 21$  km.

Um die Schwerebestimmungen isostatisch reduzieren zu können, muss man besondere Tabellen haben. Solche Tabellen sind für das Prattische System in den Vereinigten Staaten und für das Airysche System in Finnland berechnet worden.

Mit Hilfe dieser Tabellen kann man die Erdkrustendicke berechnen. Und gewöhnlich benutzt man das Kriterium, dass die Mächtigkeit der Erdkruste die plausibelste ist, *die die übrigbleibenden Schwereanomalien in der Gebirgsgegend ungefähr gleich gross macht wie die Schwereanomalien in den umgebenden Flachländern sind*. Wir können auch ein anderes, sehr gutes Kriterium benutzen, und zwar so, dass wir die Schwereanomalien als Funktion der Beobachtungshöhe darstellen. Dann bekommen wir einen deutlichen Höhenterm, und wir sagen, dass *die Mächtigkeit der Erdkruste die wahrscheinlichste ist, die diesen Term gleich Null macht*. Tab. 2 zeigt das Ergebnis für das Ferghana-Becken in Mittelasien.

Mit Hilfe dieser Methoden hat man für die Mächtigkeit der Erdkruste folgende Werte bekommen:

Tabelle II.  
Die Mächtigkeit D der Erdkruste.

	Gebiet	D	Autor
Gravimetrisch	U. S. A. . . . .	45—70 km	HEISKANEN
	Norwegen . . . .	32—38 „	
	Alpen . . . . .	35—45 „	
	„ . . . . .	30—40 „	SALONEN
	Ost-Afrika . . . .	35—60 „	BULLARD
	Ferghana . . . . .	28—40 „	EROLA
	Japan . . . . .	40—50 „	TSUBOI
Seismologisch	East Indies . . . .	50 „	„
	Kalifornien . . . .	35—39 „	GUTENBERG
	Eurasien . . . . .	50—60 „	„
	Ozeanien . . . . .	20—25 „	„
	Pazifischer Ozean	0 „	„
	Kontinente . . . .	25—35 „	JEFFREYS

Man kann aber auch mit Hilfe der *seismologischen Methoden* die Mächtigkeit der obersten Erdschichten bestimmen, und man ist nach *Jeffreys* und *Gutenberg* ungefähr zum folgenden Ergebnis gekommen: Die Erdkruste besteht aus zwei oder eigentlich aus drei Schichten, wenn man auch die Sedimentschicht mitnimmt, deren Mächtigkeit bis 10 km steigen kann. Die folgenden Schichten sind zuerst die Granitschicht, deren Dichte 2.7 ist und deren Mächtigkeit 10—15 km und unter den Alpen 30 km ist, dann die Mittelschicht mit der Dichte cca. 2.9 und der Mächtigkeit 15—25 km, oder zusammen 25—40 km und unter den Alpen etwa 50 km. Diese Schichten bilden die sog. kontinentale Schicht, deren Mächtigkeit nach *Gutenberg* unter den Kontinenten etwa 40—50 km und unter dem Atlantischen, dem Indischen und dem Arktischen Ozean etwa 20 km beträgt und die unter dem Stillen Ozean ganz und gar zu fehlen scheint. Diese Werte stimmen gut mit den gravimetrischen Ergebnissen überein, wenn man die Schwereanomalien mit Hilfe des Airyschen Systems erklärt. Und diese Uebereinstimmung geht bis in die Einzelheiten.

Die Airysche Hypothese postuliert z. B., dass die Mächtigkeit der Erdkruste unter den Ozeanen geringer und unter den Gebirgsgegenden grösser als unter den Flachländern sein muss, oder gerade so wie die seismologischen Resultate zeigen. Wir kom-

men also unzweideutig zu der Schlussfolgerung, dass die Gebirge und Kontinente ihre Wurzelgebilde haben müssen. Nach der Airyschen Auffassung geschieht die isostatische Kompensation direkt unter der Topographie, so dass z. B. die Wurzeln der Gebirge gerade unter den Gebirgsketten liegen; die Kompensation ist lokal. Nach *Vening-Meinesz* wird das Gewicht der Gebirgsketten von einer breitem Fläche getragen, so dass die Wurzeln breiter sind und nicht so tief wie bei der lokalen Kompensation; die Kompensation geschieht in diesem Falle regional (Fig. 4.). Nach *Airy*

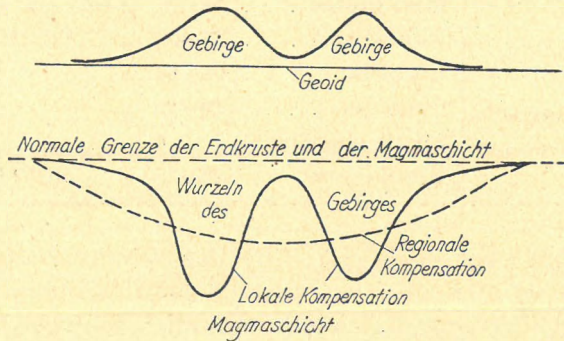


Fig. 4.

#### Lokale und regionale Kompensation.

sind auch kleine Flächeneinheiten isostatisch kompensiert, nach *Vening-Meinesz* nur grössere Blöcke, deren Dimensionen von 40 bis 200 km oder noch mehr sein können. Benutzt man die regionale Kompensation, so bekommt man etwas kleinere Werte für die Mächtigkeit der Erdkruste als durch der lokalen Kompensation.

Die Airysche Auffassung führt uns der Wirklichkeit näher in solchen Gebieten, wo die Erdkruste gebrochen ist, die *Vening-Meinesz*sche Auffassung dort, wo die Sedimentschichten langsam wachsen und die Erdkruste langsam sinkt. In Fennoskandien hat während der Eiszeit eine regionale Kompensation der Eismassen stattgefunden, und die postglaziale Landerhebung geschieht jetzt regional.

Beide Auffassungen stimmen in der Hinsicht überein, dass nach

beiden die *Gebirgsketten Wurzeln haben müssen*, entweder schmaler und tiefer (*Airy*) oder breiter und dünner, (*Vening-Meinesz*), und dass unter den Ozeanen entsprechende Antiwurzeln sein müssen. Wenn die Wurzeln sich direkt unter der Topographie befinden und genügend tief sind, befindet sich das Gebiet im isostatischen Gleichgewicht. Wenn die Wurzeln zu tief sind, ist das Gebiet überkompensiert, wenn dagegen die Wurzeln zu flach sind, ist das Gebiet unterkompensiert und nicht im isostatischen Gleichgewicht. Ähnlich verhält es sich im Falle dass irgendwo, wie z. B. in Ostindien, Wurzeln vorhanden sind ohne daraufliegende Bergsmassen oder dass es Bergsgipfel ohne Wurzelgebilde (Horstgebilde) gibt.

Solche Gebiete, wo das isostatische Gleichgewicht herrscht, sind sehr interessant, aber noch interessanter sind die Gebiete, die den Idealzustand des schwimmenden Gleichgewichts noch nicht erreicht haben, denn gerade solche Gebiete geben uns Hinweise über die gerade jetzt in der Erdkruste und unter derselben vor sich gehenden Erscheinungen. Wir können sagen: wenn es stimmt, ist es gut, wenn es nicht stimmt, ist es interessant.

Jetzt beginnen wir solche Gebiete zu besprechen, die die interessantesten Fälle bilden. Von diesen Gebieten ist Ostafrika von Dr. *Bullard*, Japan von Prof. *Tsuboi und mir*, das westliche Mittelmeer von Ing. *Kajamaa*, Zypern von Dr. *Mace*, das Fergana-Becken von Ing. *Erola*, Indien von *Burrard* und *Glennie*, die Philippinen von *Lejay*, und von den Streifen der negativen Schwereanomalien der japanische Streifen, östlich von Japan, von *Matuyama*, der ostindische Streifen von *Vening-Meinesz* und der westindische von den amerikanischen Forschern wie *Hess*, *Field* und *Ewing* untersucht worden.

Diese Streifen der negativen Schwereanomalien sind unbedingt die allerinteressantesten Regionen und diejenigen, die unsere Kenntnisse über die Struktur der Erdkruste viel erweitert haben. Von diesen Streifen ist das ostindische Band, das *Vening-Meinesz* durch seine epochemachenden gravimetrischen Weltreisen mit dem Unterseeboote gefunden und näher untersucht hat, der grösste und interessanteste. Er beginnt westlich von Sumatra und läuft südlich von Sumatra und Java über Timor und dann im grossen Bogen über Tanimber, Key und Ceram und westlich von Halmaheira über die Talaul-Inseln und hört zwischen den Philippinen und der Philippinen-Tiefe auf und ist etwa 8000 km lang. Wie der Streifen nördlich von den Philippinen läuft, ist noch nicht unter-

sucht worden. Es scheint aber möglich zu sein, dass er mit dem japanischen Streifen in Verbindung steht und folglich viel gewaltiger ist als man jetzt weiss. Ob die Verlängerung des Streifens längs der Küste von Formosa und der Riukiu-Inseln oder über die Marianen und östlich von den Bonin-Inseln läuft, ist nicht sicher. Es kann auch möglich sein, dass es zwei Streifen gibt, einen westlichen längs der Küste der Riukiu-Inseln und einen östlichen, der östlich von den Bonin-Inseln liegt.

Die Breite des Streifens beträgt 100—200 km, und die negativen isostatischen Schwereanomalien steigen bis  $-150$ , sogar bis  $-200$  milligal, während die Anomalien auf beiden Seiten des Streifens  $+40$  bis  $+100$  milligal positiv sind. Er läuft grösstenteils an der Seeseite des Inselbogens entlang, im übrigen folgt er aber keineswegs der Topographie.

Ganz ähnlich ist auch der etwa 4000 km lange Streifen in Westindien. Der untersuchte Teil desselben beginnt nordwestlich von Kuba, läuft am nördlichen Teil von Kuba entlang, nördlich von Haiti und Puerto Rico und über die Brownson-Tiefe und weiter im grossen Bogen östlich der Kleinen Antillen nach Trinidad und endlich an der Küste von Venezuela entlang. Die Breite dieses Streifens beträgt auch etwa 100—200 km, und die isostatischen negativen Schwereanomalien steigen bis zu  $-150$  milligal und sogar etwas mehr. Auf beiden Seiten sind die Anomalien  $+30$  bis  $+50$  milligal positiv. Auch hier läuft der Streifen längs der Aussenseite der Inselbögen, folgt aber durchaus nicht der Topographie. So sind z. B. über der Bartlett-Tiefe, die nordwestlich von Jamaika in mehr als 5000 m Tiefe eintaucht, die isostatischen Schwereanomalien gar nicht negativ, sondern  $+80$  milligal positiv.

Der von *Matuyama* untersuchte Teil des japanischen Streifens beginnt südöstlich von Hokkaido und läuft zwischen der Insel Honshu und der Nippon-Tiefe bis nach den Bonin-Inseln und ist beinahe 2000 km lang. Die noch nicht isostatisch reduzierten Anomalien des Streifens sind grösser als  $-150$  milligal, während auf beiden Seiten, insbesondere auf der Innenseite des Streifens die Anomalien stark positiv sind. Ganz auf dieselbe Weise wie der ostindische und der westindische Streifen liegt auch dieser auf der Seeseite des Inselbogens, aber nicht oberhalb der Meerestiefe, sondern zwischen ihr und dem Inselbogen.

Weil diese näher untersuchten Streifen sich augenfällig ähnlich verhalten, müssen sie auch durch ähnliche Ereignisse im

Erdinnern entstanden sein. Welches sind diese Ereignisse? Durch die isostatische Reduktion wird nur ein Teil der Anomalien erklärt, wie wir gesehen haben. Auch können die Massenstörungen, die diese Streifen hervorgebracht haben, nicht in der allerobersten Erdschicht liegen, weil die Streifen so gut wie gar nicht der Topographie folgen. *Die Ursache muss also tiefer liegen.* Meiner Meinung nach gibt die manchmal referierte und von den meisten Forschern anerkannte *Einknickungstheorie (Buckling Hypothesis)* von *Vening Meinesz*, die er zum erstenmal im Jahre 1930 skizzierte und später eingehender untersucht hat, die beste Erklärung dieses Phänomens.

*Vening-Meinesz* betrachtet eine elastische horizontale, unter der Wirkung einer horizontalen pressenden Kraft liegende Platte, die in einer nachgiebigen plastischen subkrustalen Schicht schwimmt, Solange die kompressive Kraft unterhalb einer bestimmten Grenze liegt, bleibt die Platte eben. Wenn diese Grenze aber überschritten wird, beginnt die Platte Wellen zu bilden, die mit der pressenden Kraft wachsen, bis eine der Wellen einknickt und eine Wurzel der leichteren Masse in der plastischen Schicht bildet. Es ist leicht zu verstehen, dass die Welle eher unterwärts einknickt als aufwärts sich wölbt, denn wenn sie sinkt, hat sie nur den Widerstand der Dichtendifferenz zwischen der Dichte der Unterschicht und derjenigen der Erdkruste, etwa 0.6, zu überwinden; wenn sie aber emporsteigen würde, müsste die treibende Kraft die ganze Schwere der Kruste überwinden, die proportional zur Krustendicke 2.7 ist.

So sind nach *Vening-Meinesz* die Streifen der negativen Schwereanomalien entstanden. Durch horizontale tektonische pressende Kraft, die nach den Geologen in Ostindien hauptsächlich in der Richtung Nordnordwest nach Südsüdost und in Westindien von Westsüdwest nach Ostnordost wirkt, sind grosse Mengen des Erdkrustenmaterials durch Uberschiebungen in der Erdkruste angehäuft. Unter der Last dieser Zusatzmasse und unter der Wirkung des fortwährenden horizontalen Druckes ist dort die leichte Erdkrustenmasse in die nachgiebige subkrustale Simaschicht eingesunken und hat *die Wurzel* der Geosynklinale gebildet. Diese Wurzel der leichten Masse, die die plastische dichtere Simaschicht seitwärts gedrückt hat, verursacht den Streifen der negativen Schwereanomalien, während die nach beiden Seiten des Streifens gedrückten dichteren Simamassen die Ursache der positiven Schwereanomalien sind (Fig. 5.).

Diese Einknickungstheorie kann also diese Streifen erklären. Es bleibt nur übrig zu betrachten, ob solche Einknickung möglich ist. Kann eine horizontale Kompression diese Einknickung verursachen oder nur eine Überschiebung und Anhäufung des Erdkrustenmaterials? Durch seine Laboratorienversuche hat der Holländer *Kuener* und noch besser der Amerikaner *Griggs* zeigen können, dass die Bildung einer Wurzelformation tatsächlich möglich ist,

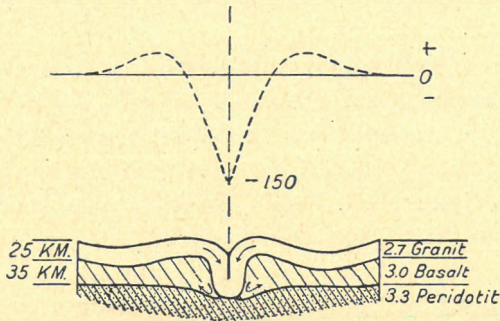


Fig. 5.

**Einknickungstheorie von Vening-Meinesz** (—150= Schwereanomalien im mgal.)

Sie benutzten eine in einem Gefässe liegende »Erdkruste«, die in einer viskosen Flüssigkeit schwamm. Der kompressive Druck der »Kruste« wurde mit Hilfe eines Kolbens, den man horizontal stossen konnte, zustande gebracht.

*Dr. Griggs* benutzte zwei Modelle, ein kleines und ein grosses, beide den Phänomenen der Erdkruste dynamisch ähnlich. In dem kleinen Modelle schwamm eine Mischung von plastischen Zylinderöl und feinem Sägemehl in einer Glycerinschicht, während in dem grossen Modelle das Substratum aus sehr viskosem Wasserglass bestand und die »Erdkruste« eine Mischung von schwerem Öl und Sand war. Es war interessant zu sehen, dass nun, als die Viskosität des Substratums gross genug war, das Modell sich nicht verhielt wie im Versuche von *Kuener*. Der Druck des Kolbens allein konnte nicht den Bruch und die Einknickung der Kruste nach unten verursachen, sondern die Krustenmasse begann, wegen des Druckes in



der Front des Kolbens eine Überschiebung und Massenanhäufung zu bilden, so dass die Experimente die Annahme von *Vening-Meinesz* nicht bestätigten. Wenn man aber noch eine kleine Kraftkomponente nach unten zu Hilfe nahm, begann eine schöne Einknickung zu entstehen und Wurzel zu bilden. Eine solche Kraftkomponente erscheint, wenn man die Phänomene der Erdkruste auf Grund der *Konvektionsströmungshypothese erklärt*, die *Holmes* zuerst skizziert hat und die *Vening-Meinesz* und insbesondere *Griggs* mit grossem Erfolge benutzt haben.

Die Konvektionsströmung ist jedem bekannt, der eine siedende Flüssigkeit betrachtet hat. Sobald die unteren Schichten etwas heisser werden, wird ihre Dichte geringer, das Gleichgewicht wird unstabil und die Konvektionsströmung beginnt. Die leichteren warmen Schichten beginnen zu steigen und die kälteren und dichteren oberen Schichten zu sinken. Wenn die Fläche der Flüssigkeitsschale gross ist, haben die Konvektionsströmungen Neigung, beinahe polygonale Zellen zu bilden und zwar so, dass die Breite der Zellen etwa dreimal die Tiefe derselben beträgt, wenn die Heizungs- und Abkühlungsflächen eben sind. Diese Eigenschaft der Konvektionsströmung verursacht in den Randgebieten der Zelle eine Strömung aufwärts, in der Mitte abwärts, und am Boden entsteht (Fig. 6.) eine horizontale Strömung von der Mitte gegen die

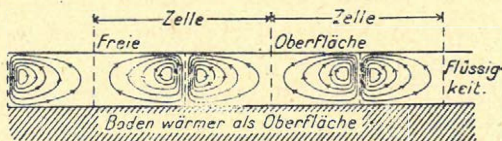


Fig. 6.

**Konvektionsströmung hat Neigung polygonale Zellen zu bilden.**

Ränder der Zelle und an der Oberfläche in der Richtung vom Rande gegen die Mitte. Die Konvektionsströmungen können also auch Ursache der horizontalen Massenverschiebungen sein.

*Können nun im Substratum der Erde tatsächlich Konvektionsströmungen entstehen?* Es ist klar, dass im Erdinnern um so höhere

Temperatur herrscht, je tiefer wir gehen; dieser normale Temperaturgradient wird aber keine Ursache der Konvektionsströmung sein. Erst dann kann eine Konvektionsströmung entstehen, wenn in irgendeiner bestimmten Tiefe die Temperatur irgendwo höher als in der Umgebung ist. Ist ein solcher horizontaler Temperaturgradient möglich?

Auf diese Frage können wir bejahend antworten. Die Temperatur der subkrustalen Schichten ist unter den Kontinenten höher als in der entsprechenden Tiefe unter den Ozeanen, und zwar aus zwei Gründen. Am Boden der Ozeane herrscht die Temperatur des Meereswassers, etwa  $4^{\circ}$ , während in derselben Tiefe unterhalb der Kontinente und der Gebirge eine Temperatur von  $100\text{--}150^{\circ}$  herrschen muss, wenn wir annehmen, dass der vertikale Temperaturgradient nur  $25^{\circ}$  pro km beträgt. Aus diesem Grunde ist die Temperatur unter den Ozeanen geringer als unter den Kontinenten, und zwar um so geringer je grösser die Meerestiefe, und unter den Kontinenten um so höher je grösser die Höhe der Landschaft ist. Und zweitens: unter den Kontinenten liegt eine etwa  $30\text{--}40$  km dicke Granitschicht, während sie unter dem Atlantischen, Indischen und Arktischen Ozean erheblich dünner ist und unter dem Grossen Ozean ganz und gar zu fehlen scheint und durch eine Basaltschicht ersetzt worden ist, deren Wärmeerzeugung etwa dreimal geringer als die des Granits ist, so dass auch diese Eigenschaft dahin wirkt, dass die Temperatur unter den Ozeanen geringer als unter den Kontinenten ist.

Aus diesem Grunde muss Wärmeausgleich durch die Konvektionsströmung stattfinden und zwar so, dass unter den Ozeanen die Strömung abwärts und unter den Kontinenten, wo die Temperatur höher ist, aufwärts geschieht.

Wenn wir noch mit *Griggs* annehmen, dass die Konvektionsströmungen periodisch sind, so können wir die Einknickungstheorie sehr gut erklären. Und es ist höchst wahrscheinlich, dass die Konvektionsströmungen periodisch sind. Wenn nämlich die Strömung des Materials schneller vor sich geht als die Abkühlung der Wärmeleitung, wird das warme Material der steigenden Kolumne in die sinkende Kolumne übertragen, bevor es Zeit hat, sich durch die Wärmeabgabe abzukühlen, und in ähnlicher Weise wird das kältere Material der sinkenden Kolumne in die steigende Kolumne übertragen, ehe die Wärmezufuhr es gewärmt hat. Diese Übertragung verringert die treibende Kraft der Konvektion, und wenn sie

vollständig genug ist, muss die Konvektionsströmung abbrechen (Fig. 7.).

Nach *Griggs* gibt es folgende vier Phasen im Konvektionszyklus:

1. Phase: langsam akzelerierende Strömung, 25 Mill. Jahre;
2. Phase: Periode der schnellen Strömungen, 5—10 Mill. Jahre;
3. Phase: dezelerierende Strömung, 25 Mill. Jahre;
4. Phase: Ruhe, 500 Mill. Jahre.

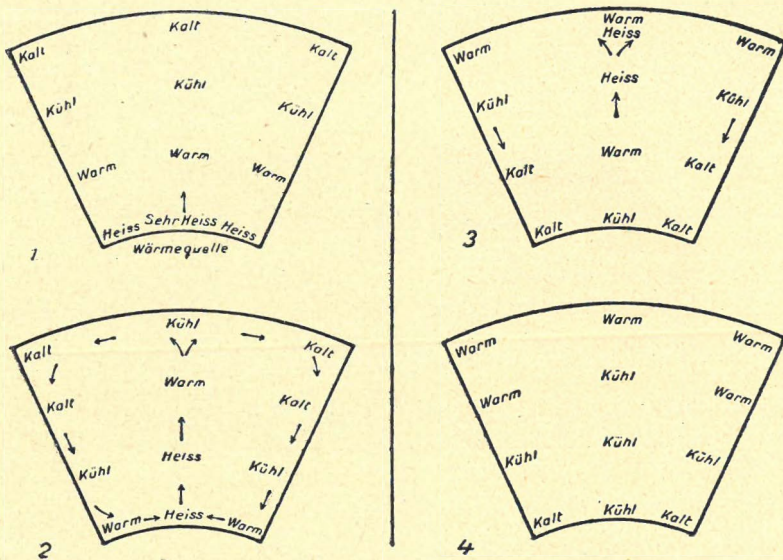


Fig. 7.

**Periodische Konvektionsströmungen.**

(nach *Griggs*)

1. Die Anfangsbedingungen, 2. Periode der schnellen Strömungen, 3. Periode der dezelerierenden Strömungen, 4. Ruhezustand.

In den Versuchen bekam *Griggs* die Bewegung der subkrustalen Masse, die der Konvektionsströmung ähnelte, so zustande, dass er im »Substratum« seines Versuches zwei Trommeln aufstellte, die um zwei horizontale Achsen in entgegengesetzten Richtungen rotieren konnten. Die Ergebnisse waren folgende.

Solange die Trommeln langsam rotierten, entstand in der plastischen Kruste zwischen den Trommeln eine Verdichtung, die etwas nach unten zu zunahm, so dass eine winzige Depression entstand. Wenn aber die Rotation schneller wurde, wurde die Kruste immer dicker und bildete endlich eine schmale Wurzel (Fig. 8.). Die Krusteroberfläche wurde unregelmässig geschichtet, und ihre Oberfläche war durchschnittlich etwas niedriger als vor dem Beginn des Versuches. Und als die Rotation endlich aufhörte, kam die dicke Kruste ins Gleichgewicht, so dass ihre Oberfläche erheblich höher war als zu Anfang des Versuches. Die Ähnlichkeit der Versuchsergebnisse mit der Struktur der Erdkruste in Ost- und Westindien und in den Alpen war also auffallend.

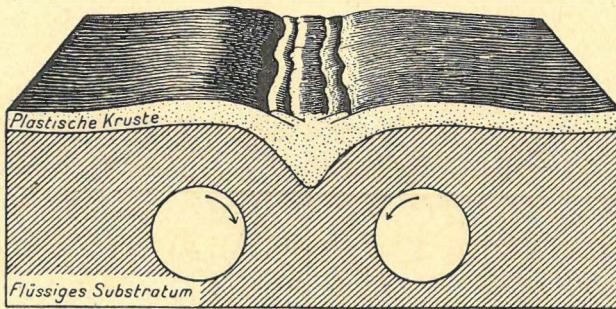


Fig. 8.

**Beiderseitige Konvektionsströmung (nach Griggs) verursacht schöne symmetrische Wurzelbildung.**

Wenn aber nur eine Trommel in Rotation war, war die Wirkung eine ganz andere. Die Wurzelbildung war breiter und in solcher Weise asymmetrisch, dass die Seite gegenüber der rotierenden Trommel steiler war als die andere Seite. Und bei steigender Rotationsgeschwindigkeit wurde die Kruste oberhalb der rotierenden Trommel dünner und dünner, und die Krustenmasse wurde in die Verdichtungsstelle der Kruste übertragen. *Endlich kehrte die subkrustale Strömung die Kruste ganz und gar weg und schichtete sie in ein mit Wurzeln versehenes Gebirge auf* (Fig. 9.). Das Resultat ist tatsächlich verblüffend; insbesondere eröffnet die Tat-

sache, dass die einseitige subkrustale Strömung die Erdkruste durchaus wegkehren kann, eine feine Möglichkeit, die Bildung des Pazifiks und der zirkumpazifischen Gebirge zu erklären. Im Lichte dieser Versuche verstehen wir auch das Fehlen der Granitschicht unterhalb des Pazifischen Ozeans besser.

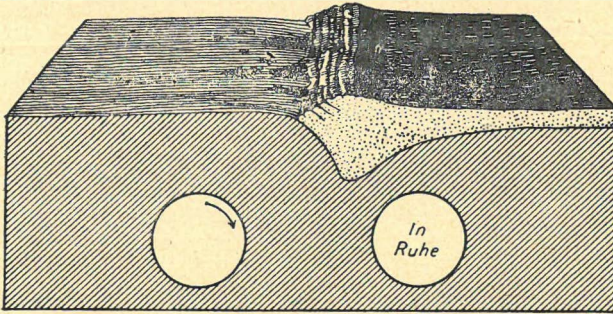


Fig. 9.

**Einseitige Konvektionsströmung kann das Krustenmaterial ganz und gar wegkehren. (nach Griggs).**

Diese Versuche von *Griggs* erklären gut die drei Phasen der Gebirgsbildung (Fig. 10.). Die Geosynklinale bildet sich, wenn die Konvektionsströmungen langsam sind, die Überschiebungen und die Wurzelformationen, wenn die Strömungen schnell sind, und endlich geschieht die Erhebung der Masse zum isostatischen Gleichgewicht, wenn die Strömungen langsam werden und ganz und gar aufhören. Die Streifen der negativen Schwereanomalien in Ost- und Westindien und östlich von Japan sind *in zweiter Phase ihrer Bildung*. Und weil sie die Wurzelbildung haben und keine darauf liegenden Gebirge, so sind die Schwereanomalien stark negativ. Fertige Gebirgsketten, wie z. B. die Alpen und die Rocky Mountains, sind in dritter Phase ihrer Bildung und befinden sich schon beinahe im vollständigen isostatischen Gleichgewicht. Und weil die Masse der Wurzel, durch das aufgehobene Gebirge kompensiert wird, sind die Schwereanomalien nahe Null. Im Lichte dieser Annahme verstehen wir gut auch die Tatsache, dass *gewisse Formationen im unvollständigen isostatischen Gleichgewicht*

Millionen Jahre lang sein können, was früher schwierig zu verstehen war. Dies geschieht nämlich solange die schnellen Konvektionsströmungen vor sich gehen.

Laut der Konvektionsströmungshypothese liegt die ursprüngliche Ursache der horizontalen Massenverschiebungen und der Gebirgsbildung *verhältnismässig tief im Substratum und zwar dort, wo die Konvektionsströmungen stattfinden*. Der horizontale Teil der Strömungen verursacht die Überschiebungen der Krustenmasse, während die Wurzelbildungen durch den vertikalen Teil derselben

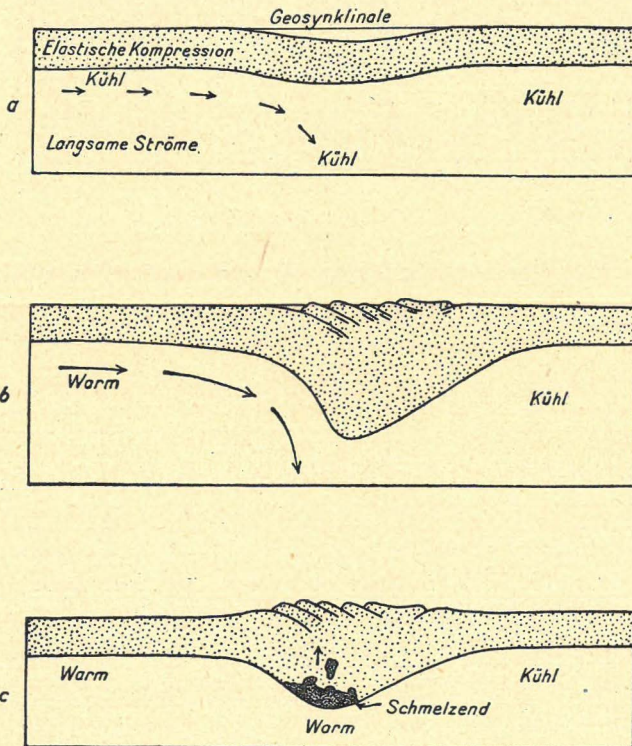


Fig. 10.

Periodische Konvektionsströmungen können die drei Phasen der Gebirgsbildung erklären. (nach Griggs).

a. Bildung der Geosynklinale, b. Massenanhäufung und Wurzelbildung, c. Die allmähliche Erhebung zum isostatischen Gleichgewicht.

entstehen. Im Lichte der Konvektionsströmungshypothese sind auch die tiefen Erdbeben, deren Herd in der Tiefe von 250—700 km liegt, nicht besonders schwierig zu verstehen.

Obgleich wir den Laboratoriumsversuchen kein zu grosses Gewicht zumessen können, weil doch die Verhältnisse im Laboratorium denjenigen in der Erdkruste und im Substratum nicht vollständig ähneln können, so müssen wir doch zugeben, dass die schönen Experimente von *Griggs* eine grosse Stütze für die Konvektionsströmungshypothese als Ursache und treibende Kraft der Gebirgsbildung gegeben haben. Die Experimente bestätigen, dass durch die subkrustale Konvektionsströmung eine horizontale Verschiebung der Krustenmasse entsteht, die die bekannten gewaltigen Überschiebungen der Krustenschichten verursacht, aber sie zeigen auch, dass auch eine genügend grosse vertikale Kraftkomponente entsteht, die die Erdkruste in der Massenanhäufungsstelle nach unten verschiebt und die Wurzeln bildet, wie die Einknickungstheorie im Einklange mit der Verteilung der Schwereanomalien im ost- und westindischen Archipel behauptet.

Die grossen regionalen Schwereanomaliengebiete führen auch zu erheblichen *Geoidundulationen* die mit Hilfe der Lotabweichungen und Schwereanomalien bestimmt werden können. In solchen Ländern, wo ein genügend dichtes Lotabweichungsnetz vorhanden ist, kann man ohne weiteres die *Lotabweichungsmethode* benutzen. Und in solchen Fällen kann man nicht nur die grossen Undulationen sondern auch die *Feinstruktur* des Geoids bestimmen, und zwar mit grosser Genauigkeit. Diese Methode führt aber deswegen nicht weit, weil solche Gebiete, wo genügend viele Lotabweichungsstationen vorliegen, sehr beschränkt, und oft miteinander nicht verbunden sind, so dass auch die kleinen Geoidteile, die bestimmt worden sind, *nicht Teile eines und desselben Geoids sind*. Ausserdem versagt die Lotabweichungsmethode auf den Ozeanen aus leicht verständlichen Gründen ganz und gar.

Wenn man also das Geoid um die ganze Erde herum bestimmen will, hat man keine andere Möglichkeit als die *Schwereanomalienmethode* anzuwenden, die sich auf den berühmten Satz von *Stokes* stützt.

Bei der Bestimmung der Undulationen  $N$  des Geoids im Verhältnis zum Ellipsoid, kann  $N$  in mehrere Teile, z. B. in zwei Teile eingeteilt werden, so dass ein Teil  $N_1$  vom Schwerefelde der nächsten Umgebung, z. B. bis 300—500 km weit von dem zu

bestimmenden Punkte, während  $N_2$  von dem ganzen Schwerefeld ausserhalb dieser Grenze herrührt. Der kontinentale Teil  $N_2$  gibt die *kontinentalen Undulationen* des Geoids, der lokale Teil  $N_1$  die *Feinstruktur* desselben an.

Um die Schwereanomalienmethode anwenden zu können, müssen die beobachteten Schwerewerte aufs Meeresniveau reduziert werden, und zwar am besten nach den isostatischen Methoden. Und weil man mit Hilfe der isostatisch reduzierten Schwereanomalien auch die Struktur der Erdkruste gut untersuchen kann, wie wir gesehen haben, so ist die isostatische Reduktionsarbeit für die Erdwissenschaften sehr wichtig.

Um diese Arbeit und dadurch die Untersuchung der Struktur und Figur der Kruste zu fördern, begründete die Internationale Geodätische Association an ihrem Kongress in Edinburg in Jahre 1936 ein besonderes Institut, das unter den Namen »Isostatie Institute of the International Association of Geodesy« in Helsinki, in Finnland gearbeitet hat, und dessen Direktor zu sein ich die Ehre gehabt habe.

Die wichtigsten Aufgaben dieses jungen Institutes sind: die Vereinfachung der isostatischen Reduktion der Schwereanomalien, die Ausführung der Reduktion der einzelnen Stationen, die Untersuchung der Struktur der Erdkruste und jetzt auch die Bestimmung der kontinentalen Undulationen des Geoids, welche Arbeit im Kongress der Internationalen Geodätischen Association in Washington im Jahre 1939 dem Isostatischen Institute anvertraut wurde. — Schon früher hat der finnische Forscher R. A. *Hirvonen* eine wichtige Arbeit über die Undulationen des Geoids veröffentlicht.

Die zehn Publikationen des Isostatischen Institutes, von denen sieben veröffentlicht worden sind und drei im Drucke liegen, beschäftigen sich gerade mit allen diesen Problemen.

Die Arbeit des Institutes wird von der Geodätischen Association, vom finnischen Kultusministerium, von der finnischen Technischen Hochschule und von der finnischen Akademie der Wissenschaften finanziert.

**Lóczy Lajos** igazgató Heiskanen professzor előadását a következő szavakkal köszönte meg:

Mit grossem Interesse haben wir Ihre interessante Auseinandersetzungen zugehört, welche besonders für uns Tektoniker sehr lehrreich waren. Bezüglich der isostatischen Ausgleichbewegungen der Erde kann die geologische



Entwicklungsgeschichte unseres Landes besonders gute Beispiele aufweisen. Bei der Ausgestaltung des ungarischen Beckensystems spielte die wiederholte Hebung und Senkung eine grosse Rolle. Die durch die tektonische Forschung erwiesene, in der Mitteloligozänzeit erfolgte Einsenkung der Panonischen Masse und die gleichzeitige Emporfaltung der Randgebirge und Bildung des vulkanischen Andesitkranzes andererseits, dürfen gleichfalls als Äusserungen von Ausgleichsbewegungen zur Erdbalancierung aufgefasst werden. Auch in der Jetztzeit ist Ungarn nicht in isostatischen Gleichgewicht, es spielen sich in rezenter Zeit Erdkrustenbewegungen ab. Das Triangulationsamt der staatlichen Erdvermessung hat auf Grund von genauen Höhenmessungen nachgewiesen, dass das Bakony Gebirge in Hebung, während der östliche Teil des Alföld in Senkung sich befinden.

Ich spreche Ihnen lieber Herr Professor unseren besten Dank für Ihren interessanten Vortrag aus und wir möchten Sie bitten, bei Ihrer Heimkehr das schöne Finnland in unserem Namen zu begrüssen und den finnischen Kollegen unsere herzlichsten Grüsse und Glückwünsche übergeben zu wollen.

---

---

Felelős kiadó: Ióczy Lóczy Lajos dr.

Mátravölgyi-nyomda Budapest, V., Vécsey-utca 3.