

17. SALOMON, Grundzüge der Geologie, Bd. I.
18. THÜRACH, Übersicht über die Gliederung des Keupers im nördlichen Franken. Geognost. Jahreshefte 1888, S. 75.
19. WEIGELIN, *Myophoria kefersteini* MÜNSTER aus der Bleiglanzbank des Gipskeupers von Sindelfingen und *Myophoria Schmidti* nov. sp. aus den Trochitenkalken von Donaueschingen. Jahresh. d. Ver. f. vaterl. Naturkunde in Württemb. 1913, S. 257.
20. ZELLER, Beiträge zur Kenntnis der Lettenkohle und des Keupers in Schwaben. Neues Jahrbuch für Min., Geol. und Paläont., Beil.-Bd. XXV, S. 1.

Zur isostatischen Kompensation der Randsenken der Kettengebirge.

Von R. Schwinner (Graz).

Da ich diesen Gegenstand, — den HEISKANEN in Nr. 1 Bd. XVII der Geol. Rundschau erörtert — in einer Arbeit, die bei der Zeitschr. für Geophysik bereits seit Dezember eingereicht ist, — berührt habe, jedoch nur kurz, ist es nicht unangebracht, hier gleich die für die geologische Öffentlichkeit notwendigen Ergänzungen anzubringen.

Grundlage jeder mechanischen Deutung der großen Züge der Tektonik muß der Grundsatz der Isostasie sein, d. h. daß die Unregelmäßigkeiten der Massenverteilung an der Erdoberfläche durch entgegengesetzte im Untergrund „kompensiert“ werden, so daß von einer gewissen (nicht allzu großen) Tiefe ab im Erdball ungefähr hydrostatisches Gleichgewicht herrscht. Das ist keine Hypothese mehr; es ist der einfachste zusammenfassende Ausdruck der einschlägigen geodätischen Beobachtungen u. zw. in einer Form, die physikalisch von allen möglichen Annahmen die plausibelste ist. Aber wie jene isostatischen Kompensationen im Untergrund (ziffermäßig) zu verteilen wären, dafür läßt das Prinzip ziemlichen Spielraum. Ich kann da HEISKANEN nur zustimmen, daß die AIRYSche Rechnungsart der bisher meist benutzten HAYFORDschen vorzuziehen ist, welche erstere im Wesen darauf hinausläuft, die Erdkruste etwa aus Tafelschollen eines leichteren Materiales („Sal“) gebildet zu denken, die jede für sich ausbalanciert in einem schwereren („Sima“) schwimmen, wobei ich allerdings gegenüber der Praxis der Geodäten betonen muß, daß diese Schollen nach der wirklichen Tektonik abgegrenzt werden sollten, nicht willkürlich nach Gradnetz oder nach der Topographie¹⁾.

¹⁾ Ich verkenne gar nicht, daß die Topographie manchmal gut zur Tektonik stimmt, vertrete ich doch energisch auch in Kettengebirgen das Prinzip der Kontinuität der Formenentwicklung, halte es aber für gut, immer auf die eigentliche Ursache zurückzugehen und das ist die Tektonik.

Zur Durchführung der Rechnung nach AIRY braucht man drei Ziffern: die Durchschnittsdichte des Sal (ρ_1), die des Sima (ρ_2) und die Tauchtiefe (T) einer Normalscholle (deren Oberfläche gerade das Meeresniveau erreicht). Die Wahl eines solchen Wertsystems (ρ_1 , ρ_2 , T) ist zweifellos hypothetisch — aber dem kann man nicht ausweichen; denn die Attraktion der tiefliegenden Kompensationsmassen reicht auf alle Fälle nach allen Seiten, und will man davor die Augen schließen, (d. h. sich mit der BOUGUERSchen Reduktion begnügen), so hat man diese »Randstörung“ in Reinkultur, ohne irgendwie schätzen zu können, wieviel sie betrage. — Zur besseren Verständigung habe ich in dem erwähnten Aufsatz in der Zeitschr. f. Geoph. vorgeschlagen, daß die Geodäten auf eine öfters geübte Vereinfachung der Rechnung verzichten sollten, wonach man die Attraktion von Störungsmasse oben und Kompensationsmasse unten in eine Formel zusammenzieht. Man würde so trennen den Einfluß der Massenunregelmäßigkeiten der Oberfläche, die ja genau bekannt sind (oder sein könnten), und den der Kompensationsmasse unten, jene Ziffer, in der die spezielle Hypothese über die isostatische Kompensation steckt. Diese klare Trennung ist vielleicht ein bischen Rechenarbeit mehr wert.

Wie kann man nun beurteilen, welche Hypothese die beste ist, welches Wertsystem (ρ_1 , ρ_2 , T)¹⁾ man (allgemein oder für die spezielle Aufgabe) verwenden soll?

Dafür gibt es leider keine geschlossene Rechnungsmethode. Man kann die verschiedenen Hypothesen nur ausprobieren, d. h., man führt die Reduktion der Schweremessungen unter verschiedenen Annahmen durch und diskutiert, welche Resultate am plausibelsten sind. HEISKANEN a. a. O. S. 7 betrachtet die Hypothese und die Anfangsbedingungen als die besten, die die geringsten Anomalien übrig lassen.“ Das wäre richtig, wenn die Schollen tatsächlich im Gleichgewicht wären. Hat aber eine Scholle hydrostatischen Auftrieb, wie z. B. Skandinavien, also tiefere Tauchung als ihrer Last zukommt, so gebührt ihr negative Anomalie, und eine Reduktion, welche die wegschafft, ist nicht gut. Vergleichen wir hier die Angaben über die Schweiz: NIETHAMMER²⁾ hat nach HAYFORD mit 120 km Kompensationstiefe gerechnet, und bekommt, wie im Profil des Berner Oberlandes am besten und ausdrucksvollsten zu erkennen ist, negative Anomalie in den Hochalpen und positive in der Randsenke — vollkommen richtig, denn die Aarmassivscholle ist noch

¹⁾ HEISKANEN, a. a. O. spricht nur von der Ausgleichstiefe (T), die ja tatsächlich den meisten Spielraum hat, aber auch ρ_2 , die Dichte des Sima und sogar ρ_1 , die Durchschnittsdichte der Salschollen sind keineswegs als völlig sicher festgelegt anzusehen, und ihre genaue Bestimmung ist ein wichtiges Problem der Geophysik.

²⁾ Verh. der Schweizer Naturf. Ges. 102, J. Vers., Schaffhausen 1921.

in jüngster Zeit gestiegen, die Randsenke (= Seenzone) gesunken, vielleicht setzen sie die Bewegung noch heute fort. HEISKANEN nahm Ausgleichstiefe 40 km (Methode AIRY); damit verschwinden die Anomalien (wenigstens als regelmäßige Erscheinung). Bei noch geringerer Ausgleichstiefe würden Anomalien mit dem entgegengesetzten Vorzeichen sich ergeben (vgl. Geolog. Rundsch. XVII, S. 7). Aber mit Ausgleichstiefe 40 km verschwinden auch die Anomalien in Skandinavien¹⁾.

Und dieses Krustenstück muß, weil in Auftrieb befindlich, unbedingt negative Anomalie haben! Auch ist 40 km Krustendicke zu wenig. Ich halte die 60 km, die GUTENBERG aus seismischen Daten berechnet hat, für ziemlich niedrig, jedenfalls nur für einen Durchschnittswert. Die Alpen müssen tiefer tauchen. Aber schon mit 60 km Kompensationstiefe wird die AIRYsche Methode²⁾ zu demselben Bilde führen, das NIETHAMMER gegeben hat, und das der Tektoniker und Morphologe fordern muß. Massiv negative, Randsenken positive Anomalie.

Eine wesentliche Unterstützung findet diese Auffassung in der anderen Reihe von Beobachtungsdaten, welche die Schwerkraft betreffen, nämlich den sogenannten Lotabweichungen. Eine restlose, geologische Auswertung derselben wäre eine Aufgabe, die noch ein bisschen weitläufiger sein dürfte als die Diskussion der isostatischen Reduktion, und die eigentlich noch niemand versucht hat. Für unseren Zweck einer ersten Orientierung genügt aber die allgemeine Übersicht, welche die Zusammenstellung der Schweizer Lotabweichungen³⁾ gewinnen läßt und zwar dank dem glücklichen Zufall, daß zum Referenzort, mit Lotabweichung 0, Bern gewählt wurde, das fast genau in der Achse des „Schweizer Mittellandes“ liegt. Da zeigen nun ohne Ausnahmen die Stationen nördlich von dieser Achse, am Nordrand der von der Molasse erfüllten Senkung (Hohentwiel, Zürich, Neuchâtel, Dôle usw.) Lotablenkung nach Süden, stets mit einer gewissen Ostkomponente, d. h. fast normal zur Achse und zwar in die Molassesenke hinein. Die Stationen südlich dieser Achse aber gegen den Alpenrand zu, (Pfänder, Säntis, Zug, Napf, Gurnigl, Naye usw.) haben Lotablenkung gegen Nord und West, wieder normal zur Molasseachse und in die Molassesenke hinein — also weg von den Alpen! Bei aller Hochachtung vor STOKES und seinem Satz, eine Umdeutung dieses klaren Bildes ins Gegenteil auf Übergewicht in den Hochalpen und Massendefizit in der Randsenke, halte ich nicht für möglich. Damit fällt aber die KOSSMATSche Vor-

¹⁾ Nach S. 8 a. a. O., die dort zitierte Arbeit HEISKANENS kenne ich noch nicht.

²⁾ Vgl. HEISKANEN Zeitschr. f. Geoph., Bd. I., S. 226 oben.

³⁾ A. RIGGENBACH in Astr. geod. Arb. in der Schweiz, Bd. X, Zürich 1907, S. 260—273 mit Karte.

stellung der von der Last des Gebirges hinabgedrückten Randsenken, und auch das von HEISKANEN proponierte allgemeine isostatische Gleichgewicht könnte damit nur sehr gezwungen in Einklang gebracht werden. Viel wahrscheinlicher, daß solches Gleichgewicht im Einzelnen nicht besteht. Auch ob die Minuswerte der Hochalpen und die Pluswerte der Randseenzone einander die Wage halten, muß dahingestellt bleiben. Das würde eine Diskussion der Absolutwerte der Anomalien, also in letzter Linie der Normalschwere (γ_0) erfordern, die hier nicht am Platz ist. Vorläufig würde ich glauben, daß verschiedene Gebirge sich verschieden verhalten können, daß aber in der Schweiz die Minusanomalien beziehungsweise der Auftrieb die Oberhand hätten. Es ist auch nicht sehr wahrscheinlich, daß ein unmittelbarer mechanischer Zusammenhang bestünde, der ein derartiges, gegenseitiges Ausbalancieren der einzelnen Teile des Gebirgsbaues zustande brächte. Im Gegenteil, es ist viel wahrscheinlicher, daß die einzelnen Schollen sich ziemlich selbständig bewegen, und allein, jede für sich, ihrer Einstellung ins isostatische Gleichgewicht zustreben. Und diese Einheitsschollen sind in den Kettengebirgen kleiner, als man ursprünglich angenommen hatte (HELMERT schätzte etwa 100×100 km!). Das ersieht man aus den Schweizer Schwere-messungen, dem einzigen Netz, das eng genug ist, um die Verhältnisse, wenigstens zum Teil zu erfassen. An diesem Beispiel kann man die Untersuchung in den anderen Gebieten beurteilen. Man erkennt z. B., daß bei den Messungen im Kaukasus, so verdienstvoll deren Neubearbeitung durch HEISKANEN¹⁾ gewesen ist, das Hauptmoment durch die Netzmaschen durchgerutscht ist. Sonst wäre ganz unverständlich, daß alle Stationen in diesem Gebirge Plus-anomalien (nach isostatischer Reduktion natürlich) haben und erst in der Gegend von Baku beträchtliche Minusanomalien auftreten sollen. Das läßt nur die Deutung zu, daß dies die einzige Station war, welche wirklich auf einer jungen (pliozänen) Faltungszone liegt, während die andere mehr minder auf Rand-, Innensenken oder ähnlichen Ausnahmgebieten liegen müssen. Die eigentlichen Hebungszonen des Hochgebirges müssen zwischen den Stationen liegen. Übrigens, da hier auch junge vulkanische Durchbrüche anzutreffen sind, hätte das Netz der Schwerestation eher enger als in der Schweiz sein müssen, denn vulkanische Gebiete zeigen besonders rasch wechselnde Anomalien, d. h. offenbar recht oberflächennahe Störungsmassen. Doch dürfte eine derartige Vermessung des Kaukasus noch lange ein frommer Wunsch bleiben.

Das Ergebnis der Schweizer Schwere-messungen, wie es in der isostatischen Reduktion NIETHAMMERS vorliegt, ist für das Verständnis des Mechanismus der Kettengebirge von hoher Wichtigkeit.

¹⁾ Veröffentl. des finn. geod. Inst. Nr. 4, Helsingfors 1924.

Man erkennt daraus, daß das eigentliche aktive Element die Randsenken sind, deren Überschwere den nach abwärts gehenden Massentransport der Verschluckungszone (Zyklone) in Gang bringt, so wie ich es von allgemeinen, geophysikalischen Erwägungen ausgehend dargestellt habe¹⁾.

Dagegen meine ich, daß die Hebungstendenz der Gebirgsmassive nicht eigentlich aktiv ist, sondern daher stammt, daß in der Stauung, die wie eine Eispressung über der Stelle des absteigenden Konvektionsstromes (Verschluckungszone) die Schollen an- und übereinander preßt, diese verhältnismäßig leichten Klötze gewaltsam tiefer hinabgedrängt worden sein können, als ihrer individuellen Gleichgewichtslage entspricht, und daß ihr Wiederaufsteigen eher bedeutet, daß sie nunmehr der Gleichgewichtslage zustreben, als daß es eine weitere Gebirgsbildungsphase einleiten würde. Es wäre also fast eher epirogenetisch zu nennen als orogenetisch. Auch die Bildung der Randseen, die nicht wie ALBERT HEIM meint²⁾, auf eine Rücksenkung des gesamten Alpenkörpers zurückzuführen ist, sondern auf eine Faltung, welche als letzte den Außenrand des fast fertigen Gebirges umgürtet, hat mit einer Zone von Synklinalen (und wohl auch Antiklinalen, die natürlich weniger auffällig sind als die ertrunkenen Synklinalen), geschlossen in der Schweiz, in den Ost- und Südalpen aber nur mit einer lockeren Kette, welche Zwischenräume läßt³⁾, erscheint ebenso als das posthume Ausklingen der Bewegungstendenz, welche das betreffende Stück Erde im Bewegungsbild der Hauptphasen der Alpenfaltung dokumentiert hatte.

Die Schweremessung steht heute an einem entscheidenden Wendepunkt. Was über den Begriffskomplex, den man mit dem Schlagworte Isostasie bezeichnet, allgemein theoretisch ermittelt werden kann, ist völlig klar und sichergestellt. Jetzt muß ausgemacht werden, wie diese Grundsätze in einem Rechenverfahren verwirklicht werden sollen; denn daß jeder Rechner — wie jetzt üblich — das ganze Problem immer wieder neu aufrollt und ihm seine eigene Lösung gibt, ist nicht ökonomisch, erschwert die Verständigung und ist eben nur für diese Übergangszeit zulässig. Wenn in dieser Diskussion sich der Geologe zum Wort meldet, so tritt er dabei nicht bloß für seine — übrigens an und für sich auch völlig berechtigten — „Konsumenten“-Interessen ein, er ist auch in der Lage, Gesichtspunkte geltend zu machen, die dem Geodäten naturgemäß fernliegen, die aber zur Lösung des Problems berücksichtigt werden müssen.

¹⁾ R. SCHWINNER. Vulkanismus und Gebirgsbildung, Zeitschr. Vulkanologie Bd. V, S. 214.

²⁾ ALBERT HEIM, Vierteljahresschr. naturf. Ges. Zürich Bd. 39, 1894, S. 65—84.

³⁾ ROBERT SCHWINNER, Ostalpine Formenstudien, Abt. III, Heft 2, 1923, S. 104.

Was damit gemeint ist, soll an einem Beispiel gezeigt werden, das einen geologisch einfachen Fall betrifft, nicht wie die vorhergesprochenen den so verwickelten und auch unter den Geologen noch so verschieden aufgefaßten Mechanismus der Alpen. Der Geodät¹⁾ sagt: In Sörvagen, auf den Lofoteninseln, beträgt die Schwerenanomalie nach der isostatischen Reduktion $+ 0,123 \text{ cm sec}^{-2}$; und in Bodö, etwa 80 km südöstlich, $- 0,056 \text{ cm sec}^{-2}$ Wenn man mittels der Schweremessungen zwischen der AIRYschen und der PRATTschen Hypothese sicher entscheiden will, müßte man diese örtlichen Schwereanomalien beseitigen können“. — Der Geologe muß da einwenden, daß die Hypothesen von AIRY und PRATT und überhaupt jede die Isostasie betreffende, sich auf den Gleichgewichtszustand beziehen. Der Fennooskandische Schild ist nicht im Gleichgewicht, denn er steigt etwa 1 cm pro Jahr, was in Anbetracht der ungemein starken Reibung bei allen Massenverschiebungen in der Erdkruste eine dauernd wirkende beträchtliche Auftriebskraft voraussetzt. Das westlich anschließende Nordmeer ist erst in geologisch ganz junger Zeit zu seiner jetzigen Tiefe abgesunken²⁾.

Es ist ganz gut möglich, daß auch diese Bewegung heute noch fortläuft, was wir ebenso auf eine Überlastung dieser Krustenscholle deuten können. Daraus folgt aber, daß die Anomalien (draußen auf den Inseln — am Festlandsrand, keine örtlichen Anomalien sind, sondern systematisch bedingt — und zwar dadurch, daß die betreffenden Schollen nicht im isostatischen Gleichgewicht schwimmen, daß sie deswegen mit der isostatischen Reduktion nicht erfaßt werden können (gleich ob PRATT oder AIRY). Der Gedankengang der Rechnung muß hier folgender sein: Im allgemeinen schwimmen die großen Schollen der Erdkruste im Gleichgewicht. Würde dies hier ebenfalls genau zutreffen, so würde ein Hochplateau wie Norwegen eine bestimmte negative, ein Becken wie der Skandik, eine positive Kompensationsmasse erfordern. Diese verteilt man nun — nach der gewählten Hypothese von PRATT oder AIRY oder anderen, — im Untergrund und bringt ihre Attraktion an den gemessenen Schwerewerten in Abzug. Es verbleiben Anomalien von systematischem Charakter am Festland negative (fürs Nordmeer werden nicht viele Daten zur Verfügung stehen). Diese erklären wir durch eine negative Störungsmasse, die analog der isostatischen Kompensationsmasse zu verteilen, und so groß zu wählen ist, daß die Anomalien, die nach Abzug ihrer Attraktion verbleiben, keinen systematischen Cha-

¹⁾ HEISKANEN, Zeitschr. f. Geophysik I, S. 227.

²⁾ G. DE GEER, Pet. Mitt. 1912, II, S. 111—125.

rakter mehr haben¹⁾. (Ins Kinetische übersetzt, ist diese negative Störungsmasse der Auftrieb, der Skandinavien 1 cm pro Jahr hebt).

Natürlich ist es eine große Erschwerung, daß zwei ziemlich von einander unabhängige Probleme gleichzeitig gelöst werden müssen. Jedoch wenn man Gebiete verschiedener Art, Hoch-, Tief-, Hebungs- und Senkungs-Gebiete vergleicht, wird man trennen können, was der Korrektur wegen isostatischer Kompensation, und was der wegen Auftrieb zuzuschreiben ist, und beurteilen, welche Annahmen ziffermäßig die besten Resultate geben. Auf Grund der Messungen in einem, wenn auch gut durchforschten Land (U. S. A., Schweiz, Skandinavien) allein, wie man bisher versuchte, ist diese Aufgabe nicht zu lösen, selbst das ganze bisher vorliegende Material an Schweremessungen wird kaum mehr als eine provisorische Erledigung zulassen. Ich sehe aber keine Möglichkeit, dieser in der Sache selbst gelegenen Schwierigkeit auszuweichen. Mechanische Ausgleichsrechnungsmethoden müssen hier versagen, sie können nur Fehler von rein zufälligem Charakter beseitigen, Einflüsse von systematischem Charakter erscheinen auch da im Ergebnis u. z. als schwer abzuschätzende systematische Fehler. Wie der betreffende Einfluß zu beurteilen ist, hängt natürlich vom Maßstab ab. Bildet man die Mittel über die ganze Erde, so kann mancher der erwähnten Einflüsse als rein lokal, zufällig angesehen werden (betr. γ_0 vgl. den im Druck befindlichen Aufsatz der Ztschr. f. Geophysik). Handelt es sich aber um Schwereverhältnisse und Gleichgewichtszustand eines bestimmten Krustenstückes, dann ist das einzig richtige, daß man die einzelnen Schollen ganz individuell in Rechnung stellt, nach ihrer tektonischen Abgrenzung und vermutlichen Gleichgewichts- oder Ungleichgewichtslage, die, wo die direkten Messungen der Bewegung, wie von Skandinavien, fehlen, aus der Morphologie zu ermitteln ist. Wenn ich hier (u. a. a. O.) die Individualität der einzelnen tektonisch gegebenen Krustenstücke vielleicht etwas übertrieben betone — übertrieben, weil die Schollen sich nicht ganz frei bewegen und einstellen können, sondern sich, von Nachbarn wechselseitig beeinflußt und gekemmt, anpassen müssen, wodurch ein gewisser Ausgleich der Gegensätze zustande kommt — so rechtfertigt sich das dadurch, daß die Praxis der in Frage stehenden Rechnungen ohnedem nur allzu sehr dazu drängt, die bestehenden Ecken und Kanten abzuschleifen, der Geologe aber gerade auf möglichst scharfem Herausarbeiten der charakteristischen Züge bestehen muß.

¹⁾ Der Einfachheit halber habe ich von der Möglichkeit abgesehen, daß im Gebirgsbau weitere Ursachen systematischer Schwerestörungen gelegen sein könnten. Das dürfte hier zulässig sein, weil bei so alten, mehrmals unter Einebnung förmlich ausgewogenen Gebirgen diese aus dem Gebirgsbau hervorgehenden Störungen gering und von mehr lokalem Charakter zu sein pflegen.