

**S. 156—36**

**Schwinner R.**

# **Die Groß-Felder der Erdkruste, angelegt als Zellen Bénardscher Strömung**

Von

**Robert Schwinner (Graz)**

(Mit 2 Abbildungen)

Aus den Sitzungsberichten der Akademie der Wissenschaften in Wien  
Mathem.-naturw. Klasse, Abteilung IIa, 156. Bd., 7. u. 8. Heft, 1947

**Wien 1947**

In Kommission bei Springer-Verlag, Wien

Druck von Adolf Holzhausens Nfg., Wien

# Die Groß-Felder der Erdkruste, angelegt als Zellen Bénardscher Strömung

Von

**Robert Schwinner** (Graz)

(Mit 2 Abbildungen)

(Vorgelegt in der Sitzung am 26. Juni 1947)

Durch das große Werk „Studies in Hydrodynamics and Structure of stars and planets“, dessen Kenntnis ich der Freundlichkeit des Verfassers, Herrn Wasiutiński, verdanke, wurde ich darauf aufmerksam gemacht, daß die von H. Bénard experimentell erforschten Ausbildungsweisen von Konvektionsströmungen in einer von unten her erwärmten dünnen — verhältnismäßig dünn gegen ihre seitliche Ausdehnung — Flüssigkeitsschicht, wonach diese in zellenartig gegeneinander abgegrenzte Wirbelsysteme sich zerteilt, nicht bloß als Kleinformen vorkommen, sondern auch in der Größenordnung kosmischer Körper und planetarischer Vorgänge Geltung und Bedeutung hat. Es lassen sich Gestalten der Oberfläche von Sonne und Mond mit großer Wahrscheinlichkeit auf solche Strömungssysteme zurückführen, bei analogen Wolkenformen ist der Zusammenhang mit thermischer Instabilität und daraus entstehenden Konvektionsströmungen unmittelbar nachzuweisen (Mal, Walker). Auf die Physik der Erde angewendet, liefert diese Vorstellung ein Bindeglied, das bisher gefehlt hat, ein Mittelglied, das überleitet von den planetarischen Anfängen der Erde und den kosmischen Vorgängen, welche diese gestaltet und umgestaltet haben, zu den konkreten Gliederungen und Sonderungen der Erdkruste erster Ordnung, als welche man neuestens eine Einteilung in Groß-Felder erkannt hat, als Grundlage für alle weiteren tektonischen Vorgänge in der Erdkruste.

Zum Ausgangspunkt nehme ich hier als plausibelste Hypothese die der Ablösung des Mondes von der Erde, verursacht durch Resonanz der Sonnengezeiten mit freien Eigen-

schwingungen des Erdballes (G. H. Darwin). Ich weiß wohl, daß ziffernmäßige Schätzungen große Bedenken erwecken (Phys. Geol. S. 305 ff.). Aber trotzdem haben bedeutende Geophysiker sich dieser Anschauung angeschlossen; und überdies glaube ich durch meine Annahme, daß die Abtrennung des Mondes von einem ungeheuren Gasausbruch aus der Narbe begleitet war — keineswegs willkürlich angenommen, sondern geochemisch usw. wohl zu stützen (Phys. Geol. S. 309) — diese Bedenken einigermaßen abgeschwächt zu haben. Ich nehme an, daß die Erde damals wohl noch zum größten Teil in feurigflüssigem Zustand sich befand, aber bereits eine oberflächliche Schicht saureren Magmas abdifferenziert hatte, und daß diese letztere auch schon, wenigstens zum Teil, zu Schlacken und Schollenkruste erstarrt war, welche, weil eben saurer und daher leichter, entgegen der öfters geäußerten Ansicht, daß wegen Untersinkens der fest und daher schwerer als die Schmelze gewordenen Silikate die Erstarrung von innen beginnen müsse, an der Oberfläche hatten schwimmend verbleiben können. Die Differentiation und die der Krustenbildung auf dem Fuß folgende fast plötzliche Niederschlagung der Dampfhülle zum Ur-Meer mögen als Verminderung des Trägheitsmomentes den letzten Anstoß gegeben haben, den Erdball mit einem kleinen Ruck in die Resonanz hineinzustoßen. Der Abriß erfolgte nicht symmetrisch zum (damaligen) Äquator<sup>1</sup>, von der Südhalbkugel

<sup>1</sup> Das spricht für Resonanz: steht die Erdachse nicht genau normal zur Erdbahnebene, müssen die durch die Gezeiten erzeugten Schwingungen auch quere (d. i. nord-südliche) Komponenten haben, und welche im Moment des Abrisses gerade beim Ausschwingen ist, reißt mehr mit. Wäre durch Rotationsinstabilität das Köpfchen einer Poincaréschen Birne abgetrennt worden, müßte der Abriß genau symmetrisch zum (damaligen) Äquator gelegen haben.

Übrigens zeigt auch der Mond eine bezügliche Asymmetrie, nur umgekehrt: seine Nordhalbkugel zeigt weniger Sial als seine Südhälfte (Wasiutiński, S. 187). Natürlich, wenn von der Südhalbkugel der Erde mehr Sial abgerissen worden ist als von ihrer Nordhalbkugel, muß sich dasselbe Verhältnis im abgerissenen Körper, im Mond, wiederfinden. Kentern, sich von N nach S überschlagen, konnten die Massen, die sich zum Mond zusammenballten, nicht, das verhinderte das ihnen mitgegebene beträchtliche Kreiselmoment. (Das spricht auch für die Abrißhypothese.)

scheint mehr abgerissen worden zu sein als von der nördlichen. Die Abrißnarbe, in welcher das basische Substratum bloßgelegt war, bildete sich zum Pazifik-Boden um, der ja gerade durch das Fehlen der sauren Erdschicht charakterisiert ist, wie durch seismische Beobachtungen (Gutenberg) und durch geochemische Daten bezeugt ist, einzig gegenüber allen anderen Teilen der Erdoberfläche. Für diese Eigenheit des Pazifischen Raumes hat keine andere Hypothese als die der Mondablösung eine Erklärung geben können<sup>2</sup>.

Die Pazifische Narbe konnte nicht „verschorfen“: da das erste saure Differentiat weggerissen worden war und das basische Substratum bloßlag, konnten nicht leichtere Schlacken entstehen, die oben schwimmen bleiben würden<sup>3</sup>, was hier an der Oberfläche erstarrte, wurde dadurch schwerer als die Schmelze und im Konvektionskreislauf zur Tiefe gerissen. Der Tiefgang dieses Kreislaufes mußte groß sein, entsprechend dem, daß das basische Substratum von da ab bis tief hinab als homogen angesehen werden kann. Daher konnte seine Breitenausdehnung auch den ganzen Pazifik erfassen, in der Mitte hoch, allseits sich ausbreitend, am Rand zur Tiefe gehend. Ferner, da sich hier eine geschlossene Schollenpackung nicht (oder doch erst sehr spät) bilden konnte, die, wie sonst auf der Erde, einen guten Wärmeschutz abgegeben hätte, sondern basische Schmelze frei ausstrahlend lag, mit starkem Wärmeverlust, war die Konvektionszirkulation heftig. Dieses an der Oberfläche nach allen Seiten hin auseinandergehende Strömungssystem hielt den pazifischen Raum von Sialschollen und auch von saurer Schmelze frei, welche

<sup>2</sup> Ich benütze die Hypothese der Mondablösung nur deswegen, weil sie die nötigen Daten in genetisch sinnvollem Zusammenhang bringt. Wenn jemand den oben umrissenen Erdzustand ohne Begründung noch Erklärung einfach als Anfangszustand annehmen will, braucht er diese Hypothese natürlich nicht.

<sup>3</sup> Damit soll nicht gesagt werden, daß da nun purer Periodit ( $Mg_2SiO_4$ ) bloßlag, aus dem Saureres absolut nicht abdiffenziert werden kann — die innerpazifischen Vulkane bringen Basalte —, aber die eventuell noch aufzubringende saurere Abscheidung war wenig, und daher konnten die daraus sich bildenden flottierenden Schollen nicht wie sonst auf der Erde zu einer geschlossenen Kruste sich zusammenschließen.

ohne diese Gegenwirkung die tiefer gelegene Sima-Oberfläche von der Seite her hätten überfluten müssen.

Zu jener Zeit stand der Mond der Erde ganz nahe — wohlverstanden: **in jedem Falle**, ob man die Hypothese der Mondablösung annehmen will oder nicht; denn die mechanische Koppelung von Mondumlauf und Gezeitenreibung ist mathematisch zwingend, und die unter plausibeln Annahmen berechneten Zeiten stimmen dazu, daß das zu Beginn der Archaischen Zeit sich so verhalten haben müsse<sup>4</sup>. Nun ist die Gezeitenreibung umgekehrt proportional zur 6. Potenz der Entfernung zwischen Mond und Erde. Daher wird in den ersten Jahrhunderten oder Jahrtausenden, jedenfalls in einer, geologisch angesehen, ganz kurzen Zeit, unmittelbar nach der Mondablösung eine sehr große Reibungsarbeit geleistet, und dies trifft besonders die Äquatorzone. Hier reichte die aus dieser Reibung entstehende Erwärmung hin, die bereits erstarrten Schlacken und Krustenschollen wieder aufzuschmelzen<sup>5</sup>. Etwa noch ungeschmolzen gebliebene Sialschollen wurden mechanisch gegen die höheren Breiten hinausgetriftet<sup>6</sup>. Diese äquatoriale Aufschmelzungszone bildete also

<sup>4</sup> Nimmt man die säkulare Akzeleration des Mondes zu 5'', die der Sonne zu 1'', wie aus den Beobachtungen der letzten Jahrhunderte abgeleitet wird so beträgt die Zeitdauer vom Anfang — Mond nahe der Erde (die genauere Ziffer des Abstandes, 2 oder 3 Erdradien oder ähnlich, spielt dabei gar keine Rolle) — bis heute 2,4.10<sup>9</sup> Jahre (Phys. Geol. S. 300). Die höchsten Pb/U-Verhältnisse geben für die ältest bekannten Mineralien um 2.10<sup>9</sup> Jahre. Sonst haben aus radioaktiven Daten das „Alter der Erde“ berechnet Stefan Meyer zu 4,6.10<sup>9</sup>, A. Holmes zu 3.10<sup>9</sup> Jahren.

<sup>5</sup> Phys. Geol. S. 310—321, auch S. 300. Die bezüglichlichen Schätzungen habe ich inzwischen durch eine ausführliche Rechnung nachgeprüft und richtig befunden, worüber gegebenenfalls an anderem Orte zu berichten sein wird.

<sup>6</sup> Bei schief stehender Erdachse gibt es nicht bloß eine Hauptgezeitenwelle, die gerade durch den Äquatorkanal E—W läuft, sondern auch quer, meridional N—S laufende Komponenten. Die Gezeitenwellen sind nun unsymmetrisch, die steile Front (Extrem „Bore“) stößt an der Oberfläche gegen die Küsten vor, die flachere Rückseite wirkt mehr unten als Sog. Gegen flottierende Körper überwiegt daher erstere Wirkung, sie werden im ganzen gegen die Küste zu getrieben, wie man es ja am Meeresstrand allgemein sieht. Im gleichen Sinne und wahrscheinlich stärker muß das System der Konvektionsströmungen wirken, das sich in der Aufschmelzungszone neuerlich entwickeln muß: hoch in der Mitte, von da auseinander gegen die Ränder und an diesen wieder hinab. — Ein-

eine Art von mit saurer Schmelze erfülltem Graben zwischen den Festlandsinseln im N und S davon; tiefer als diese gelegen, einmal wegen der erwähnten polwärts drängenden mechanischen Impulse, hauptsächlich aber, weil diese Schmelze, obwohl sauer und daher durchaus noch als Sial zu bezeichnen, doch basischer war als jene Inseln aus alten Schlacken und Schollen. Denn die Konvektionszirkulation hatte in der Aufschmelzungszone wieder einsetzend diese wieder gründlich durchgemischt und auch vermischt mit tieferen, etwas basischeren, also schwereren Schichten, während jene Inseln nur aus dem sozusagen statisch gebildeten sauersten Differentiat bestehen. Auf dieser Grundlage bildete sich also eine Depressionszone, die Zone der Mittelmeere, die allerdings heute nicht mehr im Äquator liegt, sondern in einer Ebene, die um etwa  $30^{\circ}$  gegen diesen geneigt ist, ihr Pol liegt bei Alaska, — eine Polverschiebung, die für 2 Milliarden Jahre ja wohl nicht als übertriebene Annahme bezeichnet werden kann. Auch der Mond zeigt im Gürtel seiner „*maria*“ (Meere) eine Aufschmelzungszone — heute gegen den Äquator um  $20^{\circ}$  geneigt —, die auf die gleiche Weise und zu derselben Zeit, zur Zeit des geringen Abstandes des Mondes von der Erde, und durch die Erdzeiten auf den Mond entstanden ist.

zig in diesem Stadium der Erdentwicklung können Schollen kontinentaler Größenordnung beträchtliche Verschiebungen gegeneinander erfahren. Etwa daß durch die damals gewaltige Gezeitenreibung der Westrand der Decke aus erstarrten Sialschollen, die Kerne der Neuen Welt, Laurentia und Brasilia-Guayana (die suggestiven Formen, die diese Kontinente heute zeigen, bestanden damals noch nicht, die wurden erst im Laufe der geologischen Entwicklung, und zwar sehr spät, zusammengebaut), von der Alten Welt abgerissen und gegen West geschleppt worden wären, die Abstoßung des Pazifischen Strömungssystems ein Stück weit überwindend, wobei die tieferen sauren Schichten, die noch flüssig oder doch plastisch geblieben waren, im Sinne der Gutenbergschen Fließhypothese über die Breite des Atlantik hin ausgezogen wurden — das charakterisiert ja eben den Atlantik, daß sein Boden — anders als der des Pazifik — eine Sialschicht trägt, wenn auch eine ziemlich dünne. Aber jedenfalls muß man mit solchen Annahmen vorsichtig sein; denn die Zeit, wo die Horizontalschubkräfte groß waren, ist kurz, was den Weg, der während derselben Zeit zurückgelegt werden konnte, trotz der größeren wirkenden Kraft stark beschränkt; danach sind die Schubkräfte aber so klein, daß sie trotz der langen Zeit wenig ausrichten — wie das Prey auch mit strenger Rechnung gezeigt hat.

Was sind nun die Voraussetzungen der Bénardschen Experimente? Eine ausgedehnte, verhältnismäßig dünne Schicht einer mäßig viskosen Flüssigkeit wird von der Unterlage her, einer ebenen waagrechten Platte, sehr gleichmäßig erwärmt, so daß instabile Temperaturschichtung und Konvektionsströmungen entstehen, welche Wärme von der Unterlage zu der freien Oberfläche befördern. Unter diesen Bedingungen zerlegt sich die in der Flüssigkeit in Gang kommende Zirkulation zellenartig in lauter kleine, isolierte Wirbelringe: zuerst ziemlich unregelmäßig<sup>7</sup>, aber mit der Zeit und nach einigem Schwanken, sozusagen Ausprobieren, stellt sich eine regelmäßige Anordnung der Strömungssysteme ein, welche dann, solange die äußeren Verhältnisse sich nicht merklich ändern, ungeändert, also stabil bleibt. In diesem stabilen Endzustande sind die Zellen alle gleich groß, sechseckig, zu einem Bienenwabenmuster zusammenschließend. (Das ist offenbar die rationellste Raumausnutzung — wie bei den Bienen. Aber da unsere irdischen Strukturformen nicht so regelmäßig sind, sondern einem einigermaßen gestörten Zustand entsprechen — davon später —, brauchen wir auf dieses vielleicht interessante Isoperimeterproblem hier nicht einzugehen.) Der Vertikalschnitt einer solchen Bénardschen Zelle (s. Abb. 1) zeigt einen einfachen, annähernd kreisförmigen, horizontal gelagerten Wirbelring: in der Mitte desselben steigt die Strömung im Lot empor, breitet sich von dort an der freien Oberfläche nach allen Seiten gleichmäßig aus, sinkt rundum an den Rändern lotrecht ab und schließt dann an der Unterfläche gegen die Mitte zusammenströmend den Kreislauf. Die Linie, um welche dieser Wirbelfaden rotiert, liegt ziemlich weit außen, etwa von der Zellenwand um  $\frac{1}{6}$  ihres Abstandes von der lotrechten Mittelachse entfernt. An der Oberfläche hat die Zellenmitte die höchste Temperatur und

<sup>7</sup> Diese unregelmäßigen und schwankenden Anfangszustände dauern um so länger, je geringer die Viskosität der Flüssigkeit und je dicker die Flüssigkeitsschicht ist, ja bei sehr wenig viskosen Flüssigkeiten, wie Äther bei Zimmertemperatur, konnte das stabile Regime überhaupt nicht erreicht werden. Aber das Magma hat sicher eine nicht geringe Viskosität, und Zeit ist bei geologischen Vorgängen allemal reichlich vorzusetzen; jene unstabilen Anfangszustände haben daher für uns keine Bedeutung.

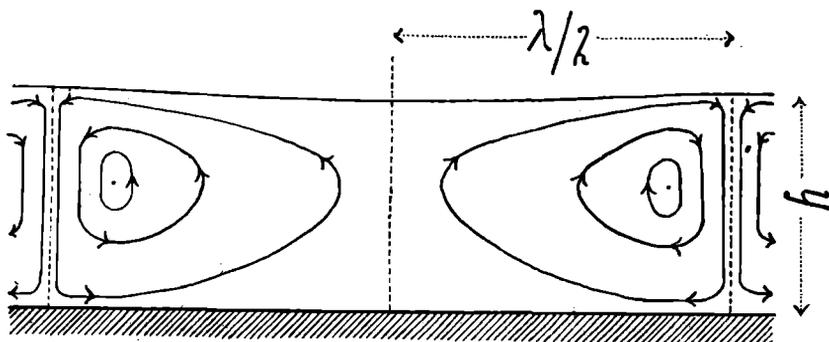


Abb. 1. Vertikalschnitt durch eine Bénardsche Zelle. (Die Höhendifferenz Mitte und Rand ist 50mal größer gezeichnet, als sie in Wirklichkeit ist.)

die tiefste Lage, von da steigt die Oberfläche nach allen Seiten gegen die Ränder hin an — allerdings sehr wenig, in Abb. 1 ist diese Überhöhung aufs 50fache übertrieben, in Wirklichkeit ist sie von der Größenordnung  $\frac{h}{1000}$  —, leichte, auf der Flüssigkeit flottierende Körper werden in dieser Richtung gegen die Kanten getriftet, wandern dann längs diesen gegen die Tripelpunkte von je 3 Zellen, die höchsten Punkte der freien Oberfläche, wo dieselben dann ihre stabile Endlage finden. Die Größe der Zellen ist grob proportional der Mächtigkeit der Flüssigkeitsschicht ( $h$ ). Es ist der Durchmesser des den Sechsecken eingeschriebenen Kreises  $\lambda \cong 3,3$  bis  $4 \cdot h$ . Sowohl bei Vergrößerung der Schichtdicke als bei Erhöhung der Temperatur wird  $\lambda/h$  etwas größer (vermutlich weil in beiden Fällen die Rolle, welche die Reibung bei dem Vorgang spielt, verringert wird, doch dürfte dieses Verhältnis über einen Grenzwert nahe bei 4 nicht hinausgehen. Dieses regelmäßige Wirbelsystem kann sich aber nur bilden, wenn die Konvektionsströmung anderweit gar nicht gestört wird. Wenn dagegen das Ganze ungleichmäßig auf Schub beansprucht ist — wobei die Achse der Rotation und die Ebenen der Scherung lotrecht oder doch sehr steil stehen —, so geht das regelmäßige Bienenwabemuster zuerst bei mäßiger Scherung über in zeilenartig angeordnete viereckige Zellen, dann bei stärkerer Scherung in längliche Wirbelrollen, gestreckt in Richtung der Scherebenen; unter

Umständen, aber seltener, werden auch Querrollen gebildet. Diese Formenentwicklung konnte, abgesehen, von Experimenten, durch Wolkenstudien (Mal, Walker) mit allen Übergängen festgestellt werden.

In jenem frühen Stadium der Erdentwicklung, das wir obens kizziert haben, war nun beste Gelegenheit zur Entwicklung Bénardscher Wirbelsysteme gegeben. Mit Ausnahme der Pazifischen Narbe lag überall eine verhältnismäßig dünne Schicht saurer oder intermediärer Schmelze, auf welcher reichlich noch saurere Schlacken oder Schollen flottierten, über einem basischen Substratum. Dieses war nun allerdings selber nicht fest wie die Unterlage bei Bénards Experimenten. Aber weil die Konvektionsströmung keinesfalls etwas von dem oben liegenden saureren, also leichteren Differenziat ins basischere, also schwerere Substratum hinabtragen noch aus letzterem etwas in die leichtere Oberschicht hinaufbefördern kann, benimmt sich das Substratum mechanisch ebenso wie die feste Unterlagsplatte bei Bénards Experimenten. Und eben weil es damals noch flüssig war, erfüllt es am besten zwei weitere Bedingungen der Versuchsanordnungen, denn die untere Grenzschicht der Konvektionsströmung war „eben“, d. i. eine Niveaulfläche der Schwere, und hat gleiche Temperatur auf ihrer ganzen Erstreckung, eben weil die schwere ruhige Flüssigkeit des Substratums die hydrostatischen Gleichgewichtsbedingungen erfüllen muß. Daß die äußerste Zone der feurigflüssigen Erde instabil geschichtet war, mit weit überadiabatischem Temperaturgradienten, ist wohl unnötig weiter zu erklären.

Den einfachsten Fall, der zu regelmäßigem Bienenwabemuster führt, haben wir allerdings im damaligen Erdzustand nicht zu erwarten<sup>8</sup>. Da der Mond damals noch recht nahe stand, legte die Reibung seiner Gezeiten ein starkes Drehmoment  $E \rightarrow W$  an die Äquatorzone, damit kommt die Erdoberfläche

<sup>8</sup> Der Mond dagegen zeigt im Puiseuxschen Netz vielfach die regelmäßigen Sechsecke: auf ihm war die Gezeitenreibung anfangs so viel größer als auf der Erde zur gleichen Zeit, absolut und besonders relativ, so groß, daß er schnell zum Zustand: Umlauf- = Umdrehungszeit gebracht worden ist und dann ohne weitere Störung durch Gezeitenreibung erstarre.

in höheren Breiten unter Schub-Beanspruchung in Richtung der Parallelkreise. Dadurch werden die höheren Breiten gegenüber der Äquatorzone verdreht, anscheinend nicht gleich stark, so daß die Nordhalbkugel auch gegenüber der südlichen verdreht — etwas mehr gegen W geschaltet — erscheint, doch dürfte das von geringerer Bedeutung sein als die Differenz gegenüber dem Äquator.

Die Gestalten der Strömungssysteme des feurigflüssigen Erdballes finden durch „Einfrieren“ in Struktur und Stoffverteilung der Erdkruste Fixierung und Erhaltung und werden dadurch Gegenstand geologischer Untersuchung. Deutliche Spuren davon sind offenbar nur in den ältesten Gesteinskomplexen zu erwarten, wo diese weithin freigelegt und nicht durch jüngere Umwälzungen gestört und unkenntlich oder unabtrennbar von jüngeren Strukturen gemacht worden sind. Beides trifft in Südafrika zu, das von den beiden Unruhe-zonen der Erde, der Mittelmeerzone und dem Pazifischen Feuerkreis, weit entfernt ist und sich auch bereits einer ziemlich weit fortgeschrittenen geologischen Erforschung erfreut. Diese hat dort auch neuestens zu Anschauungen geführt, die ohne weiteres mit den Bénardschen Vorstellungen konfrontiert werden können.

Hier, längs dem Südteil der Westküste, dem bestuntersuchten Teile Afrikas, unterscheidet Cloos drei Groß-Felder. Der Mittelteil eines solchen Feldes ist flach, mit ruhiger Lagerung der Schichten, schließt gelegentlich große plutonische Körper ein, liegt verhältnismäßig tief (wurde ev. öfters im Lauf geologischer Zeit als Sedimentationsbecken tiefer geschaltet). Die Felder werden voneinander getrennt durch Streifen von komplizierter Struktur (Falten-, Schuppen-, Decken-Strukturen, Graben- und Horst-Systeme usw.). Diese liegen verhältnismäßig höher (auch als „Schwellen“ in alten Sedimentationsräumen). Wohlverstanden, die Höhendifferenz zwischen „Feld“ und „Schwelle“ ist nicht jene, die ursprünglich zwischen Mitte und Rand der Bénard-Zelle bestanden hat: diese verschwindet ja beim Einfrieren der Strömung, sondern sie geht auf stoffliche Unter-

schiede zurück<sup>9</sup>. Im Mittelteil des Feldes hat der breit aufsteigende Ast der Konvektionsströmung vielleicht einiges Material aus dem tieferen, basischeren, schwereren Untergrund mitgebracht, jedenfalls alles auf den Durchschnitt der Zelle gut durchgemischt, die Schwellen bestehen dagegen aus einem Differenziat, das von eben diesem Durchschnitt als saurer abgespalten worden ist. Diese Schlacken und Schollen schwimmen daher oben, werden von der Strömung gegen die Ränder des Feldes getriftet und dort, wo die Strömung absteigt, zuhauf gestaut, im oberen Stockwerk mit Falten und flachen Überschiebungen, im unteren als gegen die Tiefe konvergierender Fächer. Die Vorstellung, daß das Gebirge sich gerade über einer „Verschluckungszone“ (Ampferer) auftürmt, mag Fernerstehenden paradox erscheinen, ist aber nicht aus allgemeinen geophysikalischen Annahmen rein theoretisch deduziert — etwa wie sie obenstehend dem Fernerstehenden plausibel zu machen versucht worden ist —, sondern sie gründet sich auf bestimmte, sehr detaillierte Beobachtungen betreffend Gebirgsbau, Schwermessung usw. und muß dabei — ganz unabhängig von jeder Deutung — als grundlegendes Datum gelten. Auch im besonderen Falle von Südafrika ergaben die geologischen Aufnahmen an den Schwellen entsprechende Strukturen (Cloos, S. 334).

Ähnliche Felderteilung sehen wir drüben in Südamerika, und der Atlantik ist eine Doppelzeile von viereckigen Feldern — wie sie bei den unter mäßiger Scherung durchgeführten Experimenten beobachtet werden (s. S. 447) —, von deren innerem

---

<sup>9</sup> Die gleiche Ursache muß auch verschiedene Höhenlage von Feldern als Ganzes haben, besonders der Unterschied zwischen kontinentalen und ozeanischen Feldern. Das ist nicht Theorie, sondern hat bereits unmittelbare Anhaltspunkte in den Beobachtungen: man vergleiche in der Zusammenstellung von Washington (Phys. Geol. S. 173) die Durchschnitte der Analysen aus Afrika mit 58,2 %  $\text{SiO}_2$  und einem spezifischen Gewicht von 2,77, und aus dem atlantischen Raume mit 50,6 %  $\text{SiO}_2$  und einem spezifischen Gewicht von 2,85. Bei der Beurteilung darf man allerdings nicht vergessen, daß dies nicht Zusammensetzung (und Dichte) vom Untergrund selbst ist, sondern von Abspaltungen aus demselben, die durch gewisse physikalisch-chemische Vorgänge gebildet worden sind. Auch die Gruppierung der Analysen zu petrographischen Provinzen (Komagmatischen Regionen) wird im Lichte der Felderlehre zu revidieren sein.

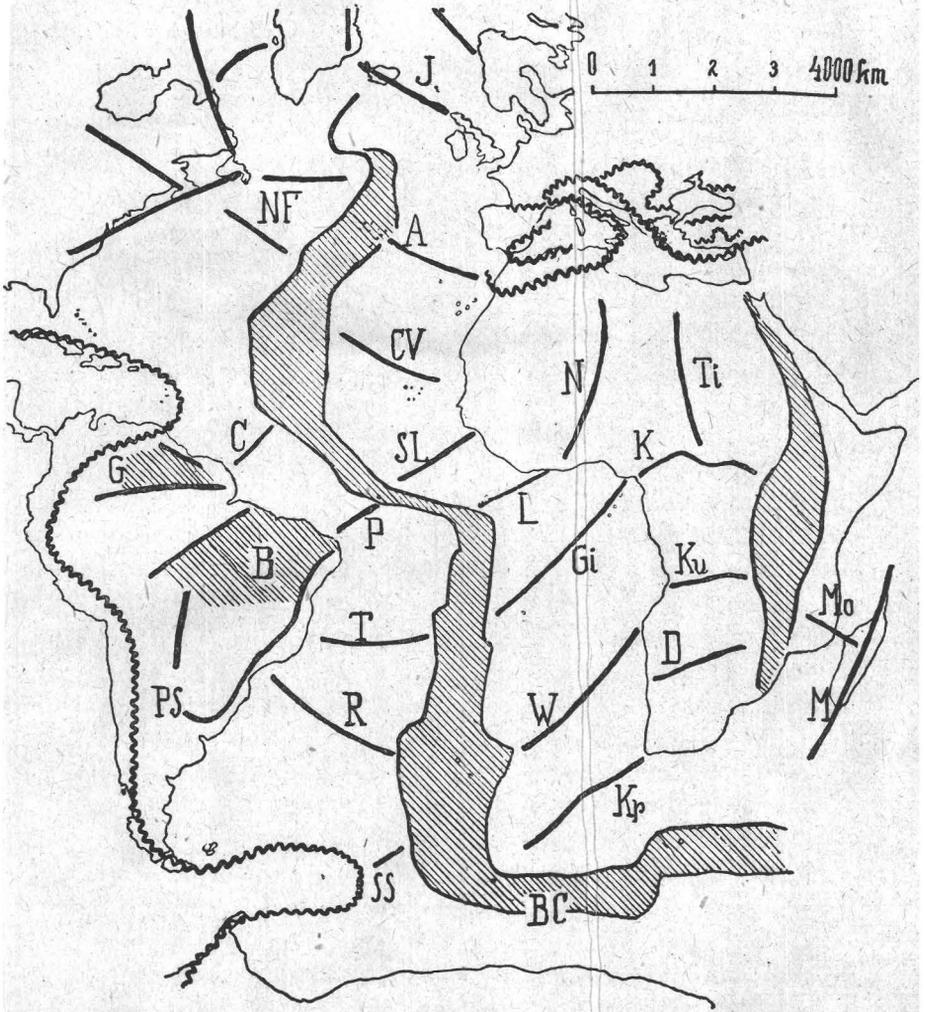


Abb. 2. Die Groß-Felder des Atlantischen Raumes.

Zeichenerklärung: Starke Linien: Schwellen (Grenzen der Zellen). Schlangelinien: junge Faltengebirge. Schraffiert: große Hochgebiete (Altkrystallin?).

Bezeichnung der Schwellen: A Azoren, B Brasilia, BC Bouvet-Crozet, C Cayenne, CV Cap Verden, D Damara, G Guayana, Gi Guinea, J Island, K Kamerun-Banda, Kp Kap (der Guten Hoffnung), Ku Kuanza, L Liberia, M Madagaskar, Mo Mosambik, N Niger, NF Neufundland (gedoppelte Schwelle?), P Para, PS Pampine Sierren, R Rio Grande, SL Sierra Leone, SS Südsandwichinseln, T Trinidad, Ti Tibesti, W Walfischrücken.

Bau wir allerdings nichts wissen können, die aber in Form und Größe den Feldern der Festländer entsprechen (Abb. 2). Vielleicht sind die ozeanischen Felder ein wenig größer als die kontinentalen, im Durchschnitt etwa  $1500 \times 2000$  km gegen  $1200 \times 1600$  km. Nach den Bénardschen Ziffern (s. S. 447) wäre der Tiefgang der Zirkulation auf 400 bis 600 km zu schätzen<sup>10</sup>. In dieser Tiefe kennen wir heute allerdings keine Trennungsfläche, am nächsten läge jene zwischen „Mantel“ und „Zwischenschicht“, heute in 1200 km Tiefe, gekennzeichnet dadurch, daß die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen bis 1200 km gleichmäßig zunimmt, dann in der Zwischenschicht (1200 bis 2900 km) aber sich nur wenig mehr ändert. Da können wir zur Erklärung annehmen, daß die Trennung Mantel/Zwischenschicht damals wie heute in 1200 km Tiefe lag, daß aber der Konvektionskreislauf nicht so tief griff, vielleicht deswegen, weil damals die Abkühlung und damit der über-adiabatische Gradient noch nicht so tief eingedrungen gewesen wäre; oder (wahrscheinlicher): der „Mantel“ hätte damals wirklich nur bis 500—600 km gereicht, aber die „Zwischenschicht“ hätte noch reichlich Silikatmaterial enthalten; dieses wäre im Laufe der Jahrmilliarden aus ihr herausdifferenziert und als leichter nach oben gewandert, und dadurch hätte einerseits der Silikatmantel seine Mächtigkeit ungefähr verdoppelt, andererseits die Zwischenschicht jene Homogenität gewonnen, die sie heute auszeichnet.

Im besonderen kann der Mittelatlantische Rücken von allen Festlandsformen am besten mit der Ostafrika in N—S-Richtung durchziehenden Hochzone verglichen werden. Östlich von dieser sehen wir nun durch Madagaskar und die krystalline Brücke der Mosambik-Straße zwei amphibische Felder gebildet, z. T. Festland, z. T. Meer, welche also Bindeglied und Übergang zwischen kontinentalen und ozeanischen Feldern vorstellen. Auch der Indische Ozean scheint in seiner Einteilung — Mittelrücken und Längszielen der durch Schwellen abgegrenz-

<sup>10</sup> Wir können versuchen, die Bénardsche Proportion auch auf den Pazifik anzuwenden. Als Tiefgang des Kreislaufes wäre dort 2900 km, bis zum Erdkern, anzunehmen. Und dem entspräche eine Breitenausdehnung von 9000 bis 10.000 km: das ist ungefähr der Durchmesser des Innerpazifischen Raumes mit bloßgelegtem Sima. (Vgl. S. 443.)

ten ozeanischen Felder — dem Atlantischen ähnlich zu sein, doch ist er noch wenig genau durchforscht. Auch die Felderteilung der Norderde (Eurasien, Nordamerika) wird noch genauerer geologischer Durcharbeitung bedürfen. In noch höherem Maße gilt das von der Mittelmeerzone. Soweit jetzt schon zu übersehen, dürften sich zwischen 50 und 60 ähnliche Felder skizzieren lassen, wohl nicht sehr regelmäßig, aber doch vielfach in Zeilen geordnet, ein Bild, ähnlich, wie es die Wolkenstudien (Mal, Walker) zeigen, das dort nach direkter Beobachtung auf die Zirkulation in einer thermisch instabilen Schichtung zurückgeht, oder gewisse kosmische Bilder (Mond, Mars bei Wasiutiński). Eine Sonderstellung nehmen demgegenüber ein der Pazifik und die Mittelmeerzone. Der Pazifische Raum stellt für sich eine einzige große Zirkulation vor (S. 443 und S. 452, Anm. 10), wohlverstanden, nur der wirklich innerpazifische: die Osterschwelle z. B. stellt einen Mittelrücken vor, analog dem mittelatlantischen- und dem Carlsberggrücken im Indischen Ozean, nur stark gegen SE auf die Seite gedrückt, und an sie mag sich im Süden noch mancherlei anschließen, was jetzt kaum bekannt ist. In der Mittelmeerzone könnten vielleicht die bizarren Bogen und Sigma-Wendungen der jungen Gebirge dadurch zustande kommen, daß ihre Falten sich um ein im Untergrunde verborgenes Rautenmuster herumranken; dann wären dort die Zellen im Durchschnitt merklich kleiner anzunehmen als sonst (der Tiefgang der Zirkulation also geringer? oder stärker deformiert? etwa zu Rollen?). Um das zu entscheiden, müßten wir in jenen Gebirgsbauten die Strukturen eindeutig und sicher nach ihrem Alter auseinanderlesen können, was heute meistens erst frommer Wunsch ist. Kurz: es besteht kein Zweifel, daß die Gliederung in Groß-Felder ein bezeichnender Zug fast überall auf Erden ist, es ist aber noch nicht möglich, ihr Bild überall mit Sicherheit zu zeichnen.

Die Gliederung der Erdkruste in Groß-Felder, wie sie durch das Bénardsche System der Konvektionsströmungen im feurigflüssigen Zustande derselben vorgezeichnet und in den ältesten geologischen Zeiten durch „Einfrieren“ festgelegt worden ist, bestimmt alle späteren Krustenbewegungen,

sie liefert sozusagen die Geleise, denen folgend alle spätere Tektonik sich „konsequent“ — wie ich es 1933 genannt habe — weiterentwickelt hat. Das hat sein Gutes. Wir können die alten großen Bausteine, die ruhigen Felderflächen, auch aus den jungen Gebirgsbauten noch herausfinden; andererseits wird dadurch die Struktur der immer wieder beanspruchten Gelenkstücke zwischen ihnen, die sich aus den ursprünglichen Wänden der Bénardschen Zellen entwickelt haben, unglaublich kompliziert. Gelegentlich bringt auch mechanischer Zusammenstoß das Fahrzeug zur Entgleisung, junge Dislokationen kreuzen „renegant“ — wie es Stille nennt — den Rahmen der älteren Anlagen und bringen ihr Bild in Unordnung; besonders in den jungen Gebirgen (Mittelmeerzone z. B.), wo diese Details an der Oberfläche dominieren, sind die großen alten Zusammenhänge schwer zu erkennen.

Abgeschlossene Ergebnisse können wir noch nicht geben, aber wir haben eine klare Fragestellung gewonnen. Dem Geologen fällt die Aufgabe zu, die Entwicklung aufzuklären, welche von den Groß-Feldern der ältesten Zeiten zu den heute beobachtbaren Strukturen der Erdkruste führt. Sache des Geophysikers wird es sein, die Möglichkeiten und Bedingungen der Strömungen im feurigflüssigen Erdball zu studieren, theoretisch, experimentell und nach Analogien bei anderen Himmelskörpern (worin Wasiutiński bereits viel geleistet hat). Die Bénardschen Vorstellungen sind imstande, von den ersten Zuständen unseres Erdballes geschlossen herabzuführen bis zu bestimmten Formen und Strukturen der heutigen Erde. Und das ist von größter Wichtigkeit. Keine noch so geistvolle geophysikalische Theorie kann naturwissenschaftlichen Wert beanspruchen, wenn sie nicht bis zu Folgerungen durchgeführt werden kann, die an konkreten, sozusagen individuellen Beobachtungen der Geologie nachgeprüft werden können.

### Schriften-Verzeichnis

Ampferer, O., Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. Jb. Geol. Reichsanst. Wien 1906, S. 539.

Bénard, H., Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en régime permanent. Ann. Chim. Phys. 7<sup>re</sup> sér., t. 23, 1901.

Cloos, H., Zur Großtektonik Hochafrikas und seiner Umgebung. Eine Fragestellung. Geol. Rundschau, 28. Bd., 1937, S. 333.

Gutenberg, B., Der Aufbau der Erde. Berlin 1925.

Holmes, A., An estimate of the age of the Earth. Nature, vol. 137, n. 3995, 1946, S. 680.

Mal, Sobhag, Forms of stratified Clouds. Beitr. Phys. d. freien Atmosphäre, 17. Bd., Leipzig 1931, S. 40.

Meyer, Stefan, Über das „Alter“ der Sonne, über die Zerfallskonstante des Actinourans und über die Mengenverhältnisse Blei: Thor: Uran auf der Erde. Sitzber. Akad. Wien, math.-nat. Kl., Abt. IIa, 1937, S. 175.

Prey, A., Über Flutreibung und Kontinentalverschiebung. Gerlands Beitr. z. Geophysik, 15. Bd., 1926, S. 401.

Schwinner, R., Die Konsequenz in der tektonischen Entwicklung, erläutert am Gebirgsbau Europas. 16. Intern. Geol. Congr., Washington 1933.

Schwinner, R., Lehrbuch der Physikalischen Geologie, I. Bd., 1936 (zitiert als Phys. Geol.).

Schwinner, R., Der Begriff der Konvektionsströmung in der Mechanik der Erde. Gerlands Beitr. z. Geophysik, 58. Bd., 1941, S. 119.

Sonder, R. A., Zur Tektonik des Atlantischen Ozeans. Geol. Rundsch. 30. Bd., 1941, S. 28.

Walker, G. T., Recent work by S. Mal on the forms of stratified clouds. Quat. J. Meteorol. Soc., 57. Bd., 1931, S. 413.

Walker G. T., and Phillips, A., The forms of stratified clouds. Ibid., Bd., 58. 1932, S. 23.

Wasiutiński, J., Studies in Hydrodynamics and Structure of Stars and planets. Astrophysica Norvegica, vol. 4, Oslo 1946.

Weber, E. H., Mikroskopische Beobachtungen sehr gesetzmäßiger Bewegungen, welche die Bildung von Niederschlägen harziger Körper aus Weingeist begleiten. Pogg. Ann. d. Phys. u. Chemie, Bd. 94, S. 447, 1855.