

Richtigstellungen zu: H. BORCHERT, „Über die Bildung der ersten Erstarrungskruste der Erde“.

Von

Robert Schwinner, Graz.

Der genannte Aufsatz¹⁾ ist als Beitrag auf einem schwierigen Forschungsgebiet gewiß schätzenswert, aber wenn der Autor schreibt: „Für mich erwuchs die Notwendigkeit zur Behandlung dieses Fragenkomplexes aus der Feststellung des Vakuums²⁾, das sich zwischen Astrophysik und Geologie im weitesten Sinne des Wortes ausdehnt. Möge man meine Studie als ersten²⁾ — vorwiegend als Anregung für die Forschung gedachten — Versuch zur Ausfüllung dieses Vakuums beurteilen“ (S. 54), so muß ich in Erinnerung bringen, daß ich schon 1927 einen Aufsatz: „Astrophysikalische Grundlagen der Geologie“ in den „Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien“³⁾ habe erscheinen lassen, in einer Zeitschrift also, welche für die deutschen Geologen nicht unbekannt und auch nicht schwer zu erreichen ist. Das Vakuum, welches Herr BORCHERT beklagt, liegt also einzig in seinen Informationen. Übrigens will ich nicht behaupten, auf diesem Gebiet der allererste gewesen zu sein, das Thema ist schon zu verschiedenen Zeitpunkten und daher auch auf verschiedene Art behandelt worden. Ich hatte nur beabsichtigt, für den Bedarf der augenblicklichen intellektuellen Situation einen Gedankengang zu skizzieren, welcher von den Anschauungen der neueren Astrophysik geschlossen bis zu den Problemen der speziellen Geologie führen würde — sozusagen von EDDINGTON bis zu STILLE — der sich also nicht in Allgemeinheiten totläuft, sondern aus den vor- und außer-geologisch gesetzten Prämissen die großen Züge des Baues und der Entwicklung der Erdkruste ableitet, ebenderselben, welche auf der anderen Seite aus der Summe der geologischen Detailbeobachtungen sich herausheben als die Hauptzüge unseres Erdbildes.

Das ist ein Programm, die Lücke zwischen Astrophysik und Geologie wirklich auszufüllen. Man kann das sicher auf mehrerlei Art an-

¹⁾ Gerl. Beitr. z. Geophys. 1930, Bd. 28, Heft 1—3, S. 32—54.

²⁾ Von mir gesperrt.

³⁾ Jg. 1926, Bd. XIX, S. 140—149.

packen, aber man darf dabei die Tektonik und die mechanischen Probleme niemals so fast vollständig vernachlässigen, wie B. in seinem Aufsatz es tut⁴). Selbst bei ängstlichster Beschränkung auf den Wortlaut des Titels („Erdkruste“) hätte z. B. ein so wesentliches Moment nicht weggelassen werden dürfen, wie diese Kruste nicht normale (isotrope) Erstarrungsstruktur bekommen hat, sondern korrelat zu den mit ihrer Erstarrung interferierenden großtektonischen Umwälzungen, eine anisotrope Durchbewegungsstruktur, kurz gesagt: Gneis, nicht Granit. BORCHERT behandelt also nur einen Teil des Problems, die allgemeinen chemisch-petrogenetischen Gesichtspunkte, und zwar diese recht ausführlich — ob als erster, wird ein Kenner der Literatur vielleicht auch hier etwas bezweifeln —, aber auch die Behandlung dieses Teilproblems führt er nicht restlos durch bis zur völligen Ausfüllung der Lücke, welche er zwischen Astrophysik und Geologie gefühlt hatte. Da genügt es nicht, zu „betonen, daß es für die Betrachtung irgendwelcher geologischer und auch geophysikalischer Probleme im heutigen Erdstadium verfehlt erscheint, in Erdschalen zu denken“, wenn der Kritiker eigentlich selbst in der „Erdschalen“-Ideologie steckenbleibt. Da mußte greifbar gezeigt werden, daß die großen Einheiten, auf welche die Betrachtung der geologischen Phänomene führt, wohldefinierte Individuen sind, welche nicht willkürlich vertauscht, gestreckt, durchschnittelt werden dürfen. Mir als Tektoniker und Alpengeologe lagen die WEGENERSchen Kontinentaltafeln, die RUEDEMANNNSchen Grundgebirgssysteme, die STILLESchen Orogenesen natürlich näher, aber ich hätte gar nichts dagegen einzuwenden, wenn jemandes Gedankengang in erster Linie auf den heute so hochgeschätzten „Bushveld Igneous Complex“ hinzielt. Nur — er muß schließlich auf bestimmte benennbare Erdteile kommen, sonst ist er eben noch nicht bei der Geologie ange-

⁴ Erst auf der vorletzten Seite (S. 53) wird unvermittelt mitgeteilt, daß „die homogene dünne Kruste . . . notgedrungen“ — ob sie diese Notwendigkeit auch richtig eingesehen hat? — „die Spannungen ganzer Erdquadranten aufnehmen mußte“ und daß für die weiter folgenden Kristallisationsvorgänge bestimmend ist, wie das Magma ins Gebiet der Kruste „abgepreßt wird“. Woher ein so abrupter Wechsel im physikalischen Regime, eine Trennung eines rein geochemischen Zeitalters von einem mechanisch-tektonischen? Gezeiten und Konvektionsströmungen gab es doch von Anfang an, und solche Impulse mußten die ersten, isoliert flottierenden Schlackenhäufungen ebensogut fassen, oder eigentlich stärker, als später die geschlossene Kruste. Wonach „die dünne homogene Kruste“, die sich anfänglich rundum gleich gebildet haben sollte, unschwer als theoretische Fiktion — zum Zwecke der leichteren Deduktion — zu erkennen ist.

langt. Diesen letzten — nicht gerade leichtesten — Schritt hat aber B. nicht getan, und daher hat er aus der Bindung seiner Vorstellungen an ein spezielles geologisches Arbeitsgebiet nicht den Nutzen gezogen, den sonst eine Berührung mit der Realität in der Naturwissenschaft meistens bringt, sondern nur den Nachteil einer einseitigen Auffassung des Gesamtproblems.

Die monoton gleichsinnige Fortentwicklung einer Magmendifferentiation bis ins Ultrabasische ist nämlich nicht das Um und Auf bei der Bildung unserer Erdkruste; im Gegenteil, das Wesentlichste des geologischen, des wirklichen Vorganges dabei ist, daß der Ablauf jenes Prozesses immer wieder unterbrochen worden ist. In den ältesten Teilen des Grundgebirges findet man neben dem saueren Granitgneis bereits „Metabasite“: die Förderung war also schon auf die basische Unterlage der saueren Erstarrungskruste angelangt, aber diese Magmentwicklung konnte sich nirgends völlig auswirken, jene Anfänge der festen Kruste wurden von weltweitem Ausbruch saurer Schmelze (jüngere Granite) förmlich überwältigt, überschwemmt und durchtränkt und finden sich immer nur als Fragmente verflößt in jener Sintflut. Die Gebiete mit solcher „Anatexis“ machen an der Oberfläche der Grundgebirgsschilde bereits einen beträchtlichen Teil aus⁵⁾, in größerer Tiefe können unsere Kontinentalfalten kaum aus etwas anderem bestehen als aus solchen durchspritzten, gemischten, wiederaufgeschmolzenen Gneisen. Eine derartige Rekurrenz liegt aber nicht im Wege einer einfachen Abkühlungsdifferentiation, sie kann nur zustande kommen, wenn jener einfache Differentiationsvorgang unterbrochen wird durch eine mechanische Umstürzung der bereits erreichten Sonderungen — sei es daß Differentiate direkt wieder durcheinander gemischt wurden, oder daß sie quasitektonisch in eine neue Lage gebracht wurden, wo sie in sich und zu den Nachbarmassen eine neue Einstellung suchen mußten. Dafür, daß derartige Rekurrenzen nur durch mechanische Umwälzung erzwungen werden, spricht, daß sie auch im späteren Verlauf der Erdgeschichte immer mit den Orogenesen korrespondieren. Es sind also zwei Tendenzen, in deren Widerstreit unsere Erdkruste gebildet worden ist: die eine Tendenz ist die nach sozusagen statischer Sonderung eines chemischen Bestandes nach den gegebenen Druck- und Temperaturgradienten; die zweite wird repräsentiert durch die dynamischen Bewegungsimpulse, die unter jenen — durch Schwere und Wärmeabfluß

⁵⁾ In Finnland mehr als $\frac{1}{5}$. SEDERHOLM, J. J. Bull. de la Comm. geol. de Finland, Nr. 70, Helsinki 1925.

bestimmten — physikalischen Verhältnissen ein aus fluidem Material aufgebauter Himmelskörper erfährt. BORCHERT will nun diese beiden Tendenzen — anstatt begrifflich — zeitlich auseinander halten; er meint, daß anfänglich die nackte Schmelze sich in Ruhe gravitativ differenzieren konnte⁶⁾, und daß erst die Bildung einer, wenn auch vorerst nur dünnen, festen Kruste die Handhabe für das Eingreifen mechanischer Kräfte geliefert hätte. Richtig kann höchstens das Gegenteil sein: wenn die werdende Kruste den Wärmeabfluß drosselte, mußten auch die von diesem abhängigen Konvektionsströmungen, Wirbel usw. gebremst werden, in einem Maße, das man etwa nach der Abschwächung schätzen könnte, welche die analogen Umwälzungen (= Gebirgsbildungen) im Laufe der geologischen Zeiten anscheinend erfahren haben. Übrigens mag diese Abnahme groß oder klein gewesen sein, sicher ist, daß eine frei, unbedeckt ausstrahlende Schmelze heftigsten Durchbewegungen unterworfen ist und daß eine feste Kruste keineswegs Bedingung dafür ist, daß mechanische Wirkungen ausgeübt werden können, sondern nur dafür, daß solche festgelegt und überliefert werden können. Beide genannten Entwicklungstendenzen — Beharrung und Konsolidierung ebenso wie Umsturz und Neubildung — haben von Anfang an zusammen- oder eigentlich gegeneinandergewirkt. Wie sie sich im einzelnen jedesmal ins Gleichgewicht gesetzt haben, ist deduktiv kaum zu erfassen, wohl aber kennen wir verschiedentlich das Ergebnis solchen Kräftespieles aus der unmittelbaren Beobachtung. Unter diesen Bedingungen sondern sich auf dem betreffenden Himmelskörper ungefähr kugelschalenähnliche Bereiche, welche wesentlich jeder durch ein eigenes, in sich geschlossenes Zirkulationssystem charakterisiert sind. Meistens wird damit auch ein stofflicher Unterschied verbunden sein, und dieser wieder spezifischen Unterschied in der Dichte bedingen. Unbedingt nötig ist aber weder das eine noch das andere, so ist z. B. die — jedenfalls für uns — wichtigste Trennung in der Atmosphäre (Troposphäre — Stratosphäre) nicht stofflich, sondern nur durch den Unter-

⁶⁾ Es ist nicht leicht einzusehen, wie sich das verträgt mit der Vorstellung, die B. an anderer Stelle vertritt, daß jenes Anfangsstadium der Erde fixsternähnlich gewesen wäre; denn was die „Pyrosphäre“ eines Fixsternes hauptsächlich kennzeichnet, sind heftigste Strömungen, Wirbel, Ausbrüche. Dagegen kann die erwähnte Differentiation durch das Absinken der zuerst ausgeschiedenen schwereren Kristalle nur bei völliger Ruhe der Schmelze zustande kommen; in Anbetracht der Viskosität einer Silikatschmelze werden recht langsame Strömungen schon genügen, jene doch nur wenig schwereren Kristalle in Schwebelage zu halten und damit den Differentiationseffekt zu verhindern.

schied im thermodynamischen Regime bestimmt (Konvektion — Strahlung), und wenn man im Wasserdampfgehalt vielleicht eine Andeutung eines stofflichen Unterschiedes sehen will, so kommt dieser nicht wegen seines spezifischen Gewichtes zur Geltung, sondern nur wegen seiner thermischen Eigenschaften. Ich führe dieses Beispiel an, um zu erinnern, daß die thermischen Eigenschaften des Materials bei der Sondierung von „Troposphären“ (im übertragenen Sinne gemeint) eine beträchtliche Rolle spielen können und nicht bloß das rohe spezifische Gewicht. Innerhalb einer solchen „Troposphäre“ wird durch die Konvektionsströmungen eine weitere stoffliche Sonderung verhindert, doch sind kleinere Umregelmäßigkeiten (Schlierenbildung) deswegen nicht ausgeschlossen: So zeigt unsere Atmosphäre, wo wir die Proben nehmen mögen, genau gleiche Zusammensetzung; dem entspricht im Geologischen die große Einförmigkeit in allen alten Gneisformationen, deren Unterschiede nicht größer sind als der Schlierenbildung in so hochviskosem Material zugebilligt werden kann⁷⁾. Ähnlich schreibt man auch

⁷⁾ H. S. WASHINGTON, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. vol. 15, Washington 1929, p. 607, hat es für nötig gefunden, besonders zu diskutieren, warum die mittlere Zusammensetzung der Erdkruste (*the average rock*) nicht überall genau die gleiche ist, sondern regional „*subordinate but marked differences*“ zeigt, „*if we assume an original liquid globe . . . the explanation of this early differentiation offers grave difficulties*“. Gegenüber diesen doch etwas übertriebenen Skrupeln muß nach geologischer Denkweise die unmittelbare („aktuelle“) Beobachtung genügen — die ja WASHINGTON schließlich selbst anführt —, daß die Oberfläche des (gasförmigen) Sonnenballes starke stoffliche Differentiation zeigt, ebenso die des (vielleicht flüssigen) Jupiter; und andererseits die Erwägung, daß die von der Konvektion getriebenen Strömungssysteme im Entwicklungsgang vom Gasball über eine Schmelze von zunehmender Viskosität zur festen Kruste immer nur schwächer werden können. Für die Durchmischung der Oberfläche kommen nur die horizontalen Stücke dieses Strömungssystemes in Betracht, die sekundär von den primär thermisch getriebenen vertikalen Konvektionströmungen in Gang gehalten werden: mit kleineren Druckgradienten und längeren Laufstrecken als jene. Diese schwachen Ausgleichsströmungen können die Durchmischung der großen Oberflächen nur langsam und mangelhaft besorgen. Das Beispiel von Sonne und Jupiter scheint zu zeigen, daß im fluiden Zustande die heftigen Strömungen keineswegs auf allgemein ausgleichende Mischung hinarbeiten, sondern hin und hin mehr oder minder tumultuarisch Sonderungen in beträchtlichem Ausmaß erzwingen. Demgegenüber sind die Verschiedenheiten unserer einzelnen Magmenprovinzen wirklich „untergeordnet“ und halten sich in jenen Grenzen, welche einem von dem ersterbenden Ausgleichsströmungen des erstarrenden Magmas nicht bewältigten Rest jener ursprünglich viel stärkeren Ungleichförmigkeit wohl zugebilligt werden kann.

dem basischen Substratum unserer Kruste große Einheitlichkeit in der Zusammensetzung zu und begründet das gewöhnlich mit der stofflichen Einförmigkeit, welche gewisse Ergußtypen von großer Massenhaftigkeit und weltweiter Verbreitung (die sog. Plateaubasalte) zeigen. Das hat sicher eine gewisse Wahrscheinlichkeit für sich; es muß aber hervorgehoben werden, daß diese Beweisführung auch schwache Seiten hat. Es könnte auch am Vorgang liegen (Eruption im Schollenlande in anorogener Ruhezeit), daß die Produkte ähnlich ausgefallen sind (wie man das ja öfters auch für den Wechsel zwischen pazifischer und atlantischer Gesteinssippe behauptet hat). Jedenfalls bedeutet ein Aufstieg von 30—40 km einen langen Weg, auch auf den thermodynamischen Zustandskurven, und man kann nicht einfach sagen, das Stammagma in der Tiefe müsse nun genau dieselbe Zusammensetzung haben wie jene vulkanisch geförderten Laven. Unter anderen Umständen — im orogenen Zyklus der Magmenentfaltung — scheinen aus demselben Tiefengebiet Reihen verschiedenartiger Spaltmagmen gefördert zu werden, auch recht saure⁸).

Die Abkühlungsdifferentiation eines irdischen Durchschnittsmagmas ist also nur eine Seite jener Vorgänge, welche unsere Erdkruste gebildet haben. Sie ist nirgends je ungestört und ganz zur Entfaltung gekommen und kann überhaupt nur kleine Bereiche in Raum und Zeit allein beherrschen. Im großen interferierte diese rein chemische Sonderungstendenz von Anfang an mit den Gegenwirkungen der vom Wärmeabfluß physikalisch bestimmten Konvektion. Daher können Deduktionen, welche sich einzig und einseitig auf die chemischen Daten stützen, wohl Einzelprobleme aufklären, im ganzen können sie aber nicht zu Bildern führen, welche mit der geologischen Wirklichkeit konfrontierbar sind.

Nachdem nun der Aufsatz BORCHERTS Gegenstand einer Besprechung geworden ist, kann nicht übergangen werden, daß derselbe auch in einigen Einzelheiten Anlaß zu Bedenken gibt. So wenn B. mit Heftigkeit die sonst meistens vertretene Ansicht bekämpft, daß nur verhältnismäßig kurze Zeit verfließen sein könne zwischen der ersten Individualisierung der Erde in noch stark verdünntem Zustande — durch

⁸) Hier ist an die allgemeine Erfahrung zu erinnern, daß die Gebiete der älteren Granite und Gneise — bergmännisch beurteilt — völlig steril sind. Dagegen bringen die Granite und andere Gesteine der jüngeren Magmenzyklen gelegentlich gewaltige Erzmengen empor. Das kann man dahin deuten, daß sie eben aus jenem im allgemeinen basischen Substratum abgespalten worden sind, in dem sich bei der Bildung jener ältesten Granitkruste die Schwermetalle angereichert hatten.

Trennung von der Sonne oder sonstwie, das würde nicht viel Unterschied machen — und der ersten Verfestigung ihrer Oberfläche. Darüber kann man leicht durch eine einfache Überschlagsrechnung klar werden. Ein Himmelskörper mit Sonnentemperatur von etwa 6000° effektiv an der Oberfläche — wie es ja B. für das erste Stadium der Erde postuliert — verliert durch Strahlung von cm^2 der Oberfläche pro Jahr rund $5 \cdot 10^{10}$ cal. Die Gesamtoberfläche der Erde ist heute (und kann damals nicht kleiner gewesen sein) $5.1 \cdot 10^{18}$ cm^2 , somit hätte eine Erde dieses Stadiums in einem Jahre an Energie verlieren müssen $2.55 \cdot 10^{29}$ cal. Den Energiegehalt der Erde nehmen wir sehr reichlich an mit 15000 cal auf 1 g der Erdmasse (nämlich 9000 cal als Kontraktionsenergie, maximal, d. i. von ∞ weg gerechnet, und 6000 cal für irgendwelche chemische Reaktionen — womit der Bemängelung B.s, daß man solche bisher zu Unrecht vernachlässigt hatte, wohl zureichend Rechnung getragen sein dürfte). Die Gesamtmasse der Erde ist $6 \cdot 10^{27}$ g und daher wäre der Gesamtenergiegehalt der Erde $9 \cdot 10^{31}$ cal. Der Vergleich der Ziffern zeigt, daß dieser Energievorrat ausreichen würde, die Strahlung einer Erdoberfläche von 6000° eff. auf die Dauer von 400 Jahren zu unterhalten! Drücken wir die Ansprüche betreffs der effektiven Temperatur auf $\frac{1}{4}$ herab (auf 1500° abs.), wobei die Strahlung im Verhältnis $\frac{1}{4^4} = \frac{1}{256}$ abnimmt, so würde die maximale „Brenndauer“ auf 100000 Jahre steigen. Man sieht leicht ein, daß an dem Wesen dieses Rechnungsergebnisses nichts geändert werden kann, wenn man nicht Energiequellen einführt, wie sie für Fixsterne angenommen werden müssen, wie sie aber auf der Erde nicht beobachtet werden. Unter allen anderen Annahmen müssen sich „Brenndauern“ ergeben, die in geologischem Zeitmaß als sehr kurz anzusehen sind. Ich halte daher an meiner ursprünglichen Ansicht (a. a. O. S. 142) fest: „Die Erde konnte sich als Miniaturfixstern nicht lange halten“, auch wenn sie — möchte ich hinzufügen — die exorbitante Oberflächentemperatur von 6000° eff. nie erreicht hat. Es scheint mir, daß diese Ansicht von den meisten Geophysikern geteilt wird, die sich mit diesem Gegenstand beschäftigt haben.

Ferner ist sehr bedenklich die Annahme B.s, daß die schweren Elemente U, Th, Ra usw. hauptsächlich durch den Strahlungsdruck in die äußeren Schichten der werdenden Erde getrieben worden wären, etwa wie heute Ca in der Sonne. Da muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß nach den Vorstellungen, welche EDDINGTON über die Fixsterne entwickelt hat, der Strahlungsdruck nur auf großen Fixsternen Werte erreichen kann, welche in der Größenordnung der Schwere nahe-

kommen. Vermutlich hat die Erde wohl nie dem idealen Fixsternmodell EDDINGTONS entsprochen, aber die Abweichungen können doch nur dahin gehen, daß die Temperatur noch geringer war, als nach jenem Modell ihrer geringen Größe zuzubilligen wäre, ihre Masse aber mehr kondensiert, die Schwere an der Oberfläche also größer, beides Momente, welche die schon nach jenen Vorstellungen nur gering anzuschlagende Bedeutung des Strahlungsdruckes noch weiter herabzusetzen geeignet sind. Und dann müßte erst nachgewiesen werden, daß unter den gegebenen physikalischen Umständen die fraglichen Elemente wirklich durch selektive Absorption in dieser Hinsicht begünstigt waren. Gewiß, daß die schweren „Radio-Elemente“ soweit nach außen getragen werden konnten — im Sonnensystem ebensowohl als in der Erde —, das ist ein schwieriges Problem, aber durch eine nicht weiter begründete Behauptung ist seine Lösung nicht viel gefördert worden.

Auch was B. über die Gashülle der Erde sagt, ist vielfach recht bedenklich. Zum Beispiel daß „die in jenem Stadium die Erde umgebende Pyrosphäre ebensowenig wie die heutige Atmosphäre erdflüchtig war“, kann kaum mit solcher Sicherheit behauptet werden, vielmehr wenn die Erde damals 6000° eff. gehabt hätte, ist (nach den von EMDEN und JEANS gegebenen Daten) anzunehmen, daß die leichteren Gase sehr merklich ins „Flüchten“ gekommen wären. Die Behauptung, welche B. aufgestellt, wird nur dadurch gerettet, daß seine Prämissen nicht zutreffen. Ferner, daß die äußerste Schicht der Atmosphäre zu allen Zeiten aus Wasserstoff bestanden hatte, muß nach den Nordlichtbeobachtungen für die Jetztzeit gerade eingeschränkt werden. Ferner, daß eine „Pyrosphäre“ freien Sauerstoff enthalten haben könnte, im Kontakt mit einer nicht vollständig oxydierten Schmelze, ist schwer vorzustellen, wird auch sonst nicht angenommen (vgl. TAMMENN, Zeitschr. f. Geophys. I, S. 30).

Hiermit schließen wir; das Vorstehende dürfte als Beleg dafür genügen, daß in diese schwierige Materie so vielerlei hineinspielt, daß eine Darstellung ohne Fehler und Übersehen selten glücken wird. Um so weniger ist es daher von Nutzen, daß gerade dieses Grenzgebiet von mehreren Wissenschaften als Tummelplatz für Originalgenies eine große Beliebtheit hat. Hier kann ein Fortschritt nur von systematischer Arbeit, unter Benutzung aller vorher erzielten Resultate, erhofft werden. Ich wiederhole: Die Arbeit von BORCHERT ist gewiß verdienstlich sie würde aber wesentlich gewonnen haben, wenn der Autor den bisher erarbeiteten und bekanntgewordenen Resultaten mehr Beachtung geschenkt hätte.