

Anteil der Schmelzflüsse an den Bewegungen der Erdkruste.

VON WALTHER PENCK †, Berlin.

Die Frage, welche Kräfte die Gebirge der Erde geschaffen haben, ist fast so alt wie die Geologie. Sie wurzelt in der frühzeitigen Erkenntnis, daß am Bau der Gebirge Gesteinsschichten teilnehmen, die ehemals unter dem Meeresspiegel abgelagert worden waren. Als sich die Beobachtungen von Gesteinsdislokationen in der Nähe von Vulkanen mehrten, als in den Granitmassen, welche im Kerne der Alpen und anderer Faltengebirge angetroffen wurden, die Erstarrungsprodukte von

Schmelzflüssen erkannt worden waren — derselben Schmelzflüsse, die man aus den Vulkanen austreten sah —, *da sah man in der vulkanischen Kraft den Erzeuger der Gebirge*. Dieser Gedanke wurde völlig überwunden durch die Kontraktionshypothese, die in der geologischen und physikalischen Erfahrung fest verankert schien: Kein Zweifel konnte bestehen darüber, daß die Erde Wärme an den Weltraum abgibt. Also — so ward gefolgert — muß sie wie jeder andere wärmeverlierende

Körper ihr Volumen verkleinern; sie muß schrumpfen. Kein Zweifel auch, daß der Erdball von einer erkalteten Kruste umhüllt ist. Schrumpft aber der Kern, so muß die ihm zu groß werdende Schale an den einen Stellen nachsinken und sich an anderen Stellen zu Falten und Wülsten zusammenschieben, so wie die Haut eines trocknenden Apfels. Faltengebirge, ozeanische Becken, kurz die großen Reliefformen des Planeten schienen ganz einfach und befriedigend erklärt. Dieser Vorzug der Einfachheit hat der Kontraktionshypothese bis heute eine zahlreiche Anhängerschaft gesichert.

Indes, gegen ihre Richtigkeit sind zuerst aus den Reihen der Geologen gewichtige Bedenken erhoben worden. Sie fußen auf der Beobachtung, daß die Gebirge nicht regellos über die Erde hin verteilt sind wie die Runzeln einer über schrumpfendem Kern zu groß werdenden Schale, sondern sie sind angeordnet in zwei schmalen Zonen, von denen die eine den pazifischen Ozean umgürtet — *der pazifische Gürtel* —, die andere vom Atlantik durch Südeuropa, Südasiens zum Pazifik hinzieht: *der mediterrane Gürtel*. Zahlreiche einzelne Gebirgsketten treten in jenen Gürteln zu Kettensystemen zusammen, die gesetzmäßig von Einsenkungen, von Saumtiefen begleitet werden. Ich erinnere an die Kettensysteme Ostasiens und Ozeaniens mit den ihnen vorgelagerten Tiefseetrögen, an das Himalajasystem und Hindustan, die Alpen-Dinariden und die adriatische Mulde, an das Kettensystem der Anden und die Atacamatiefe usw. Aber keineswegs alle Gebirgsketten bestehen aus Schichtgesteinen, die während der Gebirgsentstehung zusammengestaut und gefaltet worden sind. Nur ein Teil der Kettengebirge deckt sich mit jungen Faltenzonen, kann also Faltengebirge genannt werden, wie Alpen, Karpathen, Apennin. Der größere Teil der sonst tektonisch und morphologisch völlig gleichartigen Ketten zeigt von junger Faltung kaum Spuren. *Sie werden vielmehr gebildet von der eigentlichen Erdkruste, welche in den Faltenzonen die Unterlage der gefalteten Schichten bildet.* In diese Reihe ungefalteter Kettensysteme gehören die Gebirge Asiens von Nordiran bis über den Baikalsee hinaus, soweit sie nördlich der Himalajazone liegen, ferner ein großer Teil der Kordilleren beider Amerika und erhebliche Teile der ostasiatischen Gebirgsbögen. *Hier ist offenbar, daß die Faltung der Schichten nicht der Vorgang ist, welcher die Kettengebirge der Erde erzeugt.* Weiter aber steht von einem erheblichen Teil der Faltenzonen innerhalb der Gebirgs-gürtel — wie z. B. in den Anden oder in Ostasien — fest, daß die Faltung nur die der Erdkruste auflastenden Schichten, nicht aber die Unterlage, die Kruste selbst, erfaßt hat, nicht einmal in dem Umfang, in dem das in den Alpen, einer der stärksten Störungszonen der Erde, der Fall ist.

Mit dieser Sachlage steht die Kontraktionshypothese in unlösbarem Widerspruch, denn sie fordert, daß dem faltenden Zusammenschub

naturgemäß die ganze Erdkruste unterworfen sei. Geophysikalische Untersuchungen haben denn auch die Unhaltbarkeit der Kontraktionshypothese erwiesen. Für sie sind wie sich gezeigt hat weder die mechanischen noch thermischen Voraussetzungen auf der Erde gegeben. Hiermit berühren wir die grundlegende Bedeutung, welche die geophysikalische Forschung für die Geologie erlangt hat und besitzt.

Namentlich zwei Tatsachen hat sie bereits ermittelt, die beide zu den Fundamenten der physikalischen Geologie zu zählen sind:

a) Die Erdkruste besitzt nicht die Festigkeit, die man ihr — ausgehend von der Festigkeit kleinerer Gesteinsstücke — zuschrieb. Sie kann sich, wenn ihre Unterlage schwindet, nicht wie ein Gewölbe selbst tragen, so etwa wie eine Eierschale, die nicht zusammenbricht, wenn der Inhalt des Eies entfernt wird. Daher kann die Erdkruste auch nicht durch irgendwelche Kräfte von ihrer Unterlage abgestaut werden und dann frei stehende Gewölbe bilden ähnlich einem Tuch, das sich, auf ebener Tischfläche zusammengeschoben, von der Unterlage abhebt und frei stehende Falten bildet¹⁾. Die Erdkruste lastet vielmehr als völlig plastischer Körper, dessen Plastizität unter dem Einfluß des eigenen Gewichts nach der Tiefe zunimmt, willenlos ihrer Unterlage auf. Daher kommt es, wenn auf die Erdkruste zusammenstauende Kräfte einwirken, schon am Ort der Einwirkung zur Deformation. Und keine physikalische Möglichkeit besteht, daß solche Kräfte in der Erdkruste über weite Strecken oder gar um die ganze Erde herum weitergeleitet werden, um an bevorzugten Schwächezonen erst zur Auswirkung zu gelangen.

b) Die zweite Tatsache ist die außerordentliche Verdichtung der Materie im Erdinnern, *also in der Unterlage der Kruste.* Die Komprimierung ist dort so vollendet, daß die Materie, gleichviel ob sie fest, flüssig oder gasförmig im physikalischen Sinn zu denken ist, annähernd das kleinste Volumen, die größte Dichte besitzt, die sie überhaupt besitzen kann. *Die Komprimierung und Verdichtung ist bis zur völligen Unbeweglichkeit der Materie gesteigert.* Das geht zwingend aus dem Umstand hervor, daß die Starrheit der Erde, die bekanntlich viermal so groß ist wie die des Stahls, nicht jene Minderung zeigt, die unbedingt zu erwarten wäre, wenn im Erdinnern in irgendwelcher Ausdehnung bewegliche Zonen vorhanden wären, die auch nur den Flüssigkeitsgrad erkalteten Glases besäßen. Es ist daher physikalisch ausgeschlossen, daß ein Stück der Erdrinde spontan in die Unterlage einsinke oder durch zusammenstauende Kräfte in jene hochkomprimierte Unterlage hinabgedrückt werde, diese hydrostatisch vordringend, wie früher zur Erklärung des Vulkanismus angenommen worden ist.

¹⁾ Gewölbefestigkeit besteht erst von Gewölben an, deren Krümmungsradius unter einem bestimmten kleinen Wert liegt.

Die Folgerungen aus dieser Sachlage ergeben sich von selbst: in den Hebungen und Senkungen der Erdkruste können nicht selbständige Bewegungsvorgänge der Kruste erblickt werden, sondern sie sind die passive Begleiterscheinung, die Abbildung von Bewegungen der *Krustenunterlage*: schwillt diese, so wird die Kruste emporgetragen, schwindet sie, so sinkt die Kruste nach.

Von der *Unterlage der Kruste* kann mit Bestimmtheit gesagt werden, daß sie die Eigenschaften eines im physikalischen Sinn flüssigen Körpers besitzt: Starr und unbeweglich rasch einwirkenden Kräften gegenüber zeigt sie die Deformationen, die man Fließen nennt, wenn die Kräfte hinreichend *langsam* einwirken. Hierfür halten wir die Beweise in Händen. In erster Linie ist darauf zu verweisen, daß die Aufwölbung der Erdkruste zu Gebirgen erfahrungsgemäß unter Wahrung des Massengleichgewichts, der *Isostasie*, erfolgt. Die Erhaltung des Massengleichgewichts während der Anhäufung der Krustenmaterie zu hohen Wällen erfordert Beweglichkeit der Krustenunterlage: sie ist dann nur möglich, wenn die Kruste auf flüssiger Unterlage schwimmt. Verschiedene Erscheinungen zeigen ferner das Vorsichgehen von *Strömungen in der Krustenunterlage* direkt an. Solche sind unausbleiblich, sobald ein *Druckgefälle die flüssige oder hochplastische Materie* zwingt, wenn auch außerordentlich langsam, aus den Gebieten des Drucküberschusses nach jenen der Druckentlastung auszuweichen. Die Strömungen spiegeln sich auf der Erdoberfläche einmal in Hebungen und Senkungen der Kruste wider: stets liegen neben den Zonen der Hebung die Senkungsräume. Dann aber finden die Strömungen der Tiefe ihren nicht mißzuverstehenden Ausdruck im Wechsel der Magmaarten, die *nacheinander an den gleichen Stellen in die Kruste dringen* und von Vulkanen gefördert werden. Namentlich in den Senkungsräumen der Gebirgsgürtel wird ein derartiger systematischer Wechsel beobachtet, indem hier stets pazifisches Magma durch atlantisches abgelöst wird (z. B. Liparen: Kalkalkalmagma - Andesit, dann Alkalmagma - Tephrit). Dieser Magmawechsel bekundet, daß die Kruste zunächst pazifischem Magma aufruhete und nach dessen Abströmen und Ersetzung durch atlantisches dem letzteren. Schließlich besitzen wir direkte Nachrichten aus der Krustenunterlage nicht in den vulkanischen Ergüssen schlechthin, sondern in dem universellen Auftreten des Basalts in allen Zonen der Erde, zu allen Zeiten der Erdgeschichte; des *Basaltes*, der sich durch seine Zusammensetzung grundsätzlich von derjenigen der Erdkruste unterscheidet. Der Basalt ist ein *Fremdling, kein Abkömmling der Erdkruste*; er kann nur aus der Tiefe *unter* der Kruste stammen. Wir zweifeln demnach nicht daran, daß die Kruste von einer *flüssigen Zone* unterlagert ist. Wir sprechen von der Zone der Schmelzflüsse oder des Magmas, die dort beginnt, wo die nach dem Erdinnern zunehmenden Hitzegrade die

Schmelztemperatur der Gesteine bei den *dort* herrschenden Drucken erreicht haben. Basaltisch ist die Zusammensetzung der Magmazone, und zwar liegen, wie erwähnt, gewichtige Gründe für die Annahme vor, daß eine spezifisch leichtere *pazifische* Magmaschicht die Kruste ursprünglich allenthalben geschlossen unterlagerte, und daß darunter erst die Zone des spezifisch schwereren *atlantischen* Magmas folgt.

Lange Zeit waren die Ansichten über die Eigenschaften des Magmas geteilt. Geologische Beobachtungen über ein aktives Aufdringen stehen solchen über eine passive Beeinflussung des Magmas durch Krustenbewegungen gegenüber. Heute beginnt man die Zusammenhänge besser zu überblicken, nachdem am Kilauea die sehr beträchtlichen Volumschwankungen festgestellt worden sind, derer das Magma fähig ist, und neue chemisch-physikalische Untersuchungen an Schmelzflüssen, die wie das Magma Gemische schwer- und leichtflüssiger Stoffe sind, die Ursachen hierfür dargetan haben. Heute weiß man, daß das hochkomprimierte Magma der Tiefe bei Druckentlastung nicht nur beweglich, leichter flüssig wird, sondern vor allem, daß in ihm dann mit unwiderstehlicher Vehemenz einsetzende chemische Reaktionen zu einer eminenten Volumvermehrung und einer ganz außerordentlichen Wärmeproduktion führen. *Druckentlastung macht das Magma eruptionsfähig*. Diese Tatsache ist für die Geologie von größter Bedeutung: Entstehen an der Unterfläche der Erdkruste Spannungen, Druckdifferenzen — und die fortschreitende Abkühlung des Planeten macht solche unvermeidlich —, so ist in den Gebieten verminderten Druckes das Eindringen des Magmas in die Erdkruste, die *magmatische Intrusion*, die notwendige Folge. Die Massen, die unter solchen Umständen in die Kruste eintreten, hinterlassen in der Magmazone aber keinen Raum, den andere Massen etwa einnehmen müßten oder könnten, sondern was intrudiert, ist der *Volumgewinn, der Volumüberschuß*, den das Magma bei Druckentlastung erwirbt, und zwar bei deren Fortschreiten in stetig zunehmendem Maß. Daher kann nicht daran gedacht werden, daß Krustenmaterial in den Bereich der Magmazone zur Tiefe sinkt und dort etwa den Platz des emporgestiegenen Magmas einnimmt: dieses räumt einen solchen Platz gar nicht ein! Diese aus gesicherten chemisch-physikalischen Erfahrungen sich ergebenden Beziehungen gewinnen ihre besondere Bedeutung bei der vielfach aufgeworfenen Frage, wie das intrudierende Magma in der Kruste den benötigten Raum gewinnt. Die *Raumfrage*, das wichtigste und schwierigste Problem, das sich an die von jeher auf der Erde überaus weitverbreitete und gewaltige Dimensionen erreichende Erscheinung der magmatischen Intrusionen knüpft, wird nicht eigentlich berührt durch die Theorie, welche auf die Erscheinungen der Aufschmelzung von Krustenmaterial durch das Magma und der mechanischen Zertrümmerung der Kruste durch die Schmelz-

flüsse gegründet worden ist. Es handelt sich bei letzterem um einen Platztausch im festen und flüssigen Zustand innerhalb der Erdkruste. Das Magma breitet sich hierbei auf Kosten der zertrümmerten oder gelösten Krustenmaterie aus, steigt höher empor, d. h. es vertauscht den Platz, den es schon in der Kruste einnimmt, mit demjenigen der Krustengesteine, die sich über dem Intrusionsraum befanden. *Wie gewinnt das Magma aber jenen Raum, den es vor dem Platztausch mit höheren Krustenniveaus innerhalb der Kruste schon einnahm?* Die Schwierigkeit dieser Raumfrage beruht darauf, daß nach heutiger Kenntnis ein Volumüberschuß des Magmas intrudiert und für diesen der Platz geschaffen werden muß. Ein Platztausch zwischen Krustenmaterie und *Magmazone* kommt daher nicht in Frage, ausgeschlossen ist aber auch, daß das Magma den benötigten Raum auf Kosten der nicht weiter verdichtbaren, der inkompressiblen Kruste gewinnt: *Es bleibt nur eine Möglichkeit der Raumbeschaffung: auf Kosten der Atmosphäre, d. h. die intrudierte Kruste weicht in der einzig möglichen Richtung: nach oben aus.* Große Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang den Beobachtungen zu, durch welche zuerst in Mexiko, dann in eingehender Weise in den argentinischen Anden die Aufwölbung der Kruste durch magmatische Intrusionen nachgewiesen worden ist. Hierbei sind jene ungefalteten Gebirgsketten entstanden, welche *Großfalten* genannt worden sind und die folgendes charakteristisches Profil besitzen:



Fig. 1. Nach der Tiefe divergierende Kontakte.

Die Entstehung der Großfaltensysteme, das sind eben die Kettensysteme der Gebirgsgürtel, hat sich in dem einen Fall mit Bestimmtheit herausgestellt als ein Erzeugnis magmatischer Intrusion. Das hierbei zur Geltung kommende mechanische Prinzip ist einfach genug: das Volumen der Erdkruste ist durch die Intrusivkörper vermehrt worden, und die derart verbreiterte Kruste legt sich, da das Areal der bewegten Zone unverändert bleibt, in das wellige Auf und Ab der Gebirgsketten und zwischenliegenden Senken, eben der *Großfalten*. Allgemein erkennen wir in der *Intrusion des Magmas eine Ursache der Hebung der Kruste*. Aber mehr noch: teilt die Krustenmaterie den verfügbaren Raum, den sie vor der *Intrusion* allein innehatte, nach der *Intrusion* mit überwältigenden neu hinzugekommenen Eruptivmassen, so müssen in der bewegten Zone alle jene Erscheinungen der Kompression, des Zusammenstaus zur Entwicklung kommen, die sich notwendig einstellen, wenn in eine schwere, durch ihr eigenes Gewicht willenlos auflastende Masse Keile getrieben werden: nämlich das Gewicht und die Keilwirkung ergeben in der Resultierenden

gerichteten Druck, welcher molekulare Deformationen bewirken muß. Es überrascht daher nicht, daß in den Großfaltengebieten faltbare Schichten, wie festgestellt worden ist, Faltung, nicht faltbare tiefere Horizonte Schieferung und die größeren Tiefen Umkristallisation erfahren. Nicht überrascht ferner, daß sich die Bewegung der Kruste den in ihr schon steckenden Intrusionsmassen mitteilt: *die Intrusion setzt die Kruste in Bewegung, und dieser sind die Eruptivmassen ihrerseits naturgemäß, namentlich in den höheren Krustenniveaus, passiv unterworfen.* Man möchte glauben, daß hier ein allgemein gültiges Prinzip der Gebirgsbildung gefunden ist. Denn es unterliegt keinem Zweifel, daß die Zonen der Gebirgsbildung von jeher Krustenstreifen überwältigender magmatischer Intrusion, also nachhaltigsten Massen- und Volumzuwachses waren. Das bezeugen die ausgedehnten Intrusivkörper innerhalb der Gebirgszonen der Vergangenheit, das bezeugen die heute schon über Hunderttausende von Quadratkilometern aufgeschlossenen granodioritischen Intrusionen, die während der Entstehung der heutigen Gebirgsgürtel in diese eingedrungen sind. Und die in ihnen konzentrierten, nach Zehntausenden zählenden *Vulkane* und Effusionen beweisen, daß die wirkliche Ausdehnung der Intrusionen die erschlossenen Teile um ein Mehrfaches übertrifft. Ihre Anordnung zeigt weiter, daß die Hebungszonen, die Kettensysteme, der Ort der Intrusionen sind und nicht die vulkanfreien Senkungsräume, die Saumtiefen.

Das gesetzmäßige Auftreten der Einsenkungsräume neben den Hebungszonen zeigt aber, daß magmatische Intrusion noch andere Massenverlagerungen, und zwar solche *unter* der Erdkruste, auslöst. Die heute vorliegenden Beobachtungen geologischer und physikalischer Natur gestatten bereits, von den Umrissen jener Zusammenhänge physikalisch wohlbegründete Vorstellungen zu gewinnen. Wir gehen aus (Fig. 2) von einer nicht deformierten Kruste *k*, die unterlagert ist von pazifischem (*p*), darunter atlantischem Magma (*a*). Ist *D* eine Stelle der Druck-

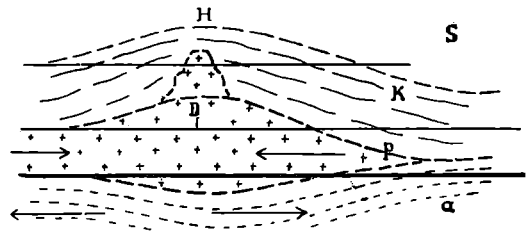


Fig. 2.

entlastung, so intrudiert hier das Magma, die Kruste wird emporgewölbt. Mit der Oberfläche hebt sich aber auch die Unterfläche der Kruste; die Druckentlastung wird damit vergrößert und auf größere Fläche verteilt. Die Folge ist eine Verstärkung der Intrusion und der Hebung, die

ihrerseits wieder die Druckentlastung vermehrt. Die Volumenergie des Magmas muß sich oben schließlich erschöpfen, da sie nicht unbegrenzt ist. Daher gibt es einen Zeitpunkt, in dem das Magma mit seiner Volumvermehrung den Raum der Druckentlastung nicht mehr erfüllen kann. *Notwendig strömt dann diesem pazifisches Magma von weiter her zu;* und über den Zonen des Abströmens sinkt die Kruste nach: der Senkungsraum *S* tieft sich neben dem Hebungsräum *H* ein. *Das ist's, was man beobachtet.*

Von dem Zeitpunkt an, da der Hebungszone *H* pazifisches Magma zuströmt, lastet dort über dem atlantischen Magma ein Überdruck, der dieses veranlaßt, im Sinne des Druckgefälles von *H* nach *S* auszuweichen. Die Folge muß sein, daß die Kruste im Bereich von *S* zuerst pazifischem, später atlantischem Magma aufrucht. Und *sind* hier Ursachen für vulkanische Effusion vorhanden, so müssen die Vulkane der Senkungsräume nach pazifischem atlantisches Magma fördern. *Das ist's, was man in den Gebirgsgürteln gesetzmäßig beobachtet. Die Hebungsräume sind demnach Zonen sich anreichernden pazifischen, die Senkungsräume solche abströmenden pazifischen und sich anreichernden atlantischen Magmas.* In Bewegung müssen gleiche Gewichte sein, weil es sich um Flüssigkeiten handelt, die nicht im labilen Gleichgewicht verharren können. Die gleichen Gewichte haben

aber verschiedene Volumen, weil das pazifische Magma geringere Dichte besitzt als das atlantische. Folglich müssen die Gebiete sich anreichernden pazifischen Magmas in der Tat als Schwellungen, diejenigen sich anreichernden atlantischen Magmas als wirkliche Senkungen entgegentreten. *Das ist's, was man beobachtet.*

Nach unserer Meinung bewirkt Intrusion und Hebung der Kruste die Störung des Magmagleichgewichts, die Strömungen innerhalb der Magmazone stellen das Gleichgewicht wieder her. Wenn das richtig ist, dann muß sich das ganze bewegte System *bis auf einen eben noch nicht kompensierten Rest im Massengleichgewicht befinden.* Die Gleichgewichtsverhältnisse der Erde sind mittels der *Schweremessung* der Beobachtung zugänglich. Sie haben ergeben, daß die Gewichtsverteilung auf der Erde streng den Forderungen unserer Theorie entspricht: Die Hebungszonen, *Gebirge*, haben größere Masse, aber geringere Dichte, als ihnen zukommt, die Senkungsräume besitzen umgekehrt wenig Masse, aber größere Dichte, als ihnen zukommt. Hebungs- und Senkungszone befinden sich *im ganzen* im Massengleichgewicht; sie sind isostatisch nahezu ausgeglichen. *Dieser Umstand zeigt, daß sich die hier entwickelte Theorie der Gebirgsbildung auch in ihren letzten Konsequenzen auf dem Boden der Tatsachen befindet.*