

**ROBERT SCHWINNER  
VULKANISMUS UND GEBIRGSBILDUNG.  
EIN VERSUCH.**

INHALTSANGABE.	Seite
I. Zusammenhang der Phänomene .....	176
II. Thermodynamische Grundlagen .....	178
III. Die möglichen Mechanismen .....	183
IV. Instabile thermische Schichtung, Konvektionsströmung .....	188
V. Das Strömungssystem der Kugelschale .....	194
VI. Der Einfluß der Drehung der Erde .....	196
VII. Antizyklone und Vulkanismus .....	198
VIII. Zyklone und Faltengebirge .....	203
IX. Die Füllflächen .....	208
X. Abhängigkeit des Strömungssystems von den Bedingungen der Oberfläche	210
XI. Örtlicher Zusammenhang von Vulkanismus und Faltung .....	219
XII. Epirogenetische Bewegungen .....	222
XIII. Vulkanismus und Geosynklinalbewegung .....	226
XIV. Schlußwort .....	229

**EINLEITUNG.**

Eine lückenlose Aufzählung der einschlägigen Literatur ist nicht möglich, gänzlich von ihrer Anführung abzusehen, schien mir auch nicht richtig. Die Auswahl der Zitate ist somit einigermaßen willkürlich.

Zur Feststellung des beabsichtigten Sprachgebrauches: Der Begriff Vulkanismus ist hier stets im weitesten Sinne genommen, als Bezeichnung für jedes Empordringen glutflüssigen Magmas in die äußere Erdkruste, gleichviel ob es nun zu einer Eruption an der Oberfläche gekommen ist oder nicht. Als Gebirgsbildung soll dagegen hauptsächlich nur die Bildung von Faltengebirgen bezeichnet werden, Faltung allerdings wieder im weitesten Sinne (als Stauung) verstanden. Diese beiden Gruppen von Phänomenen, (samt den ihnen zugeordneten Begleiterscheinungen) zusammen nennen wir orogenetische Vorgänge und orogenetische Perioden die Zeiten derartiger tiefgreifender Umwälzungen in der Erdkruste, im Gegensatz zu den epirogenetischen Vorgängen, den langsamen Veränderungen in den dazwischen liegenden Zeiten verhältnismäßiger Ruhe.

## I. ZUSAMMENHANG DER PHÄNOMENE.

Das räumliche und zeitliche Zusammentreffen zwischen den Erscheinungen des Vulkanismus und der Gebirgsbildung ist so allgemein bekannt, daß wir hier nur kurz die Hauptzüge ins Gedächtnis rufen wollen. Wir können auf der Erde, längs größten Kreisen, aber nicht ganz geschlossen und verhältnismäßig schmal, zwei Zonen abgrenzen, in denen wir die überwiegende Mehrzahl der tätigen Vulkane (und der in geologisch junger Zeit tätig gewesen),<sup>1</sup> alle jungen Faltengebirge, die hauptsächlichsten Bebengebiete und jene Meeresgräben (Vortiefen) vereinigt finden, die wir analog zu den geologisch festgestellten als rezente Geosynklinalen bezeichnen möchten.<sup>2</sup> Diese orogenetisch ausgezeichneten Zonen, mit ihren Faltengebirgsbogen, Vulkanreihen, Vortiefen usw. umwinden, im ganzen ziemlich genau anschließend, die Kontinentalblöcke; eine so regelmäßige Erscheinung, daß Ed. Suess für derartige Küsten (etwas weniger als die Hälfte aller) einen besondern Begriff, den des pazifischen Küstentyps geschaffen hat.

Das zeitliche Zusammentreffen der Phänomene können wir allerdings nur in gröberen Umrissen festlegen. Sicher ist, daß die vorgenannten Zonen, die mediterrane und die pazifische, den überwiegenden Hauptteil der Wirkungen der letzten orogenetischen Periode umfassen, also, abgesehen von den in die Kreide hinabreichenden Anfängen, des Tertiär (und noch Anfang Quartär). Genauere Zeitangabe, besonders die Parallelisierung der einzelnen Phasen der verschiedenartigen Vorgänge, wie es für die geophysikalische Deutung einzig von vollem Wert wäre, ist derzeit noch unmöglich. Geologische Zeitangaben, wenn sie nicht überhaupt fehlen, geben ihrer Natur nach keinen Zeitpunkt, sondern zwei (manchmal ziemlich weite) Grenzen, für die vulkanischen Ereignisse mangelt es meist sehr an Daten, bei der Faltung ist der Vorgang so verwickelt, daß wir noch nirgends mit Sicherheit die einzelnen Phasen und Akte vollständig von einander trennen können. Wir können nur sagen, daß die großen Perioden der Gebirgsbildung und erhöhter vulkanischer Tätigkeit sich in der Hauptsache decken, ziemlich sicher die letzte, tertiäre, mit naturgemäß mit dem Alter abnehmender Sicherheit des Erkennens auch die früheren, des Karbon, Silur etc. Die Verteilung der Phänomene

<sup>1</sup> Vgl. Arldt, Die geographische Verteilung der Vulkane. Diese Ztschr. Bd. IV. 1918. S. 33ff.

<sup>2</sup> Als Geosynklinale wird ein Meerestrog bezeichnet der ständig absinkt, dabei aber fast gleichviel Sediment anhäuft. Alle bekannten Faltengebirge bestehen größtenteils aus solchen Geosynklinalsedimentserien. Die häufige Einschaltung von submarinem vulkanischem Material in solchen ist eine weitere Analogie

der fossilen Geosynklinalen mit den rezenten Vortiefen, die auch vielfach Schauplatz eines submarinen Vulkanismus sind. (Vgl. Steinmann, die Schardt'sche Ueberfaltungstheorie und die geologische Bedeutung der Tiefseeabsätze und der ophiolitischen Massengesteine. Ber. d. naturf. Ges. Freiburg i. Br. Bd. XVI. 1905. S. 18—67).

in Raum und Zeit zeigt eine bemerkenswerte Ähnlichkeit bei beiden Hauptgruppen: Die Faltung ergreift schmale, scharf begrenzte Zonen, jedesmal für die kurze Zeitspanne eines einheitlichen Faltungsaktes, die Vulkane sind auf einen breiteren Gürtel verstreut, ihre Tätigkeit verteilt sich auf längere Zeiträume. Es ist leicht zu verstehen, daß in der tektonischen Maschine ein Rad ins andere greifen muß, einfach durch Weiterleitung der mechanischen Wirkung, dagegen scheinen die orogenetischen Vorgänge dem Vulkanismus nur sozusagen das Anfangskapital zur Verfügung zu stellen: direkt gegeben ist nur der eruptionsfähige Magmaherd, die Auswirkung seines Energiegehaltes in vulkanischen Akten wird wesentlich durch lokale Verhältnisse bestimmt. Dafür spricht auch die weitgehende Unabhängigkeit benachbarter Vulkane voneinander.

Daß es Ausnahmen von der Regel gibt: Vulkane außerhalb der vorbenannten Zonen, Faltung außerhalb der Geosynklinale, Geosynklinalen, die ohne ein Gebirge geboren zu haben, verlandet sind, usw. ist kein Einwand; gerade der Versuch, ihre Häufigkeit einzuschätzen, zeigt das gewaltige ziffermäßige Übergewicht der Regel, mehr sollte auch nicht behauptet werden. Für die älteren orogenetischen Perioden reichen die Daten für eine verlässliche Schätzung dieser Art kaum, allein nach dem Aktualitätsprinzip wird man annehmen müssen, daß die Verhältnisse damals ähnlich lagen.

Es kann nicht geleugnet werden, daß wir beim Aufstellen dieser Zusammenhänge einigermaßen an der „Oberfläche kleben“. Denn eben nur die Oberfläche der Erde, genauer bloß die des Festlandes ist unserer Untersuchung zugänglich und auch diese erst teilweise bekannt. Nur soweit wir Erhebung und Faltungsstruktur, sowie emporgedrungene Eruptiva nachweisen können, wissen wir etwas von den orogenetischen Vorgängen, der Sitz ihrer Kräfte, die ewige Teufel ist uns unzugänglich und wird es wohl bleiben.

Uebrigens liefert uns die Geophysik Untersuchungsmethoden, welche tiefer schürfen, wenn auch diese Wissenschaft viel zu jung ist, als daß ihre Entwicklung alle Möglichkeiten ausgeschöpft hätte. Aeußerst wichtige Ergebnisse sind ja bereits gewonnen. Die Schweremessung hat gezeigt, daß die großen Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche, ihre Kontinentaltafeln, Gebirgsketten, Meeresbecken durch entgegengesetzte Dichteunregelmäßigkeiten im Untergrund im großen und ganzen (sicher „bis auf wenige hundert Meter“)<sup>1</sup> kompensiert sind, und zwar liegen diese kompensierenden Dichtestörungen nicht tiefer als höchstens bis rund 120 km.<sup>2</sup> Die Erdbebenkunde lehrt die elastischen Eigenschaften der von den Erdbebenwellen durchlaufenen Schichten er-

<sup>1</sup> Helmert F. R. Die Erfahrungsgrundlagen der Lehre vom allgemeinen Gleichgewichtszustande der Massen der Erdkruste. Sitz. Ber. Akad. d. W. Berlin, 1912 S. 308 ff.

<sup>2</sup> Helmert F. R. Die Tiefe der Ausgleichsfläche

bei der Pratt'schen Hypothese für das Gleichgewicht der Erdkruste und der Verlauf der Schwerestörung vom Innern der Kontinente und Ozeane nach den Küsten. Sitz. Ber. Akad. d. W. Berlin, 1909. S. 1192 ff.

kennen. Das allgemeine Resultat, daß sich die Hauptphase unter dem Ozean langsamer fortpflanzt, als unter den Kontinenten,<sup>1</sup> wird wohl ident sein mit dem Ergebnis der Schweremessung, daß unter dem Ozean die Dichte größer ist als unter dem Land. Daß die Anomalien des Erdmagnetismus zum Aufbau der Kruste in enger Beziehung stehen, ist lange bekannt, eine geologische Auswertung der Messungen des Erdmagnetismus ist bis jetzt aber nicht gelungen (abgesehen von einigen ganz ausnahmsweisen Fällen, wie sie z. B. flach gelagerte Eisenerzlagerstätten bieten). Es spielen hier allzuvieler tellurische und kosmische Einflüsse hinein.

## II. THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN.

Aus den Schweremessungen ergab sich, daß die Unregelmäßigkeiten der Massenverteilung in der Erdkruste nur bis etwa 120 km Tiefe hinabreichen, von dieser Ausgleichsfläche ab herrscht hydrostatisches Gleichgewicht<sup>2</sup>. Notwendigerweise ist daraus zu folgern, daß die Vorgänge, welche diese Unregelmäßigkeiten geschaffen haben, und die wir, soweit sie die Oberfläche berühren, als Vulkanismus, Gebirgsbildung usw. beobachten, auch mit ihren uns unbekannt gebliebenen Teilen nicht tiefer hinabgreifen können, bzw. nicht weiter hinabgegriffen haben. Alle orogenetischen und epirogenetischen Vorgänge sind somit auf diese verhältnismäßig dünne Kugelschale, wir wollen sie die *Tektonosphäre* nennen, beschränkt, ganz ebenso wie die von uns beobachteten meteorologischen Vorgänge sich nur in der untern Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre (etwas über 10 km) abspielen, während oberhalb derselben ganz andere Verhältnisse herrschen (z. B. Umkehrung des Temperaturgradienten) und daher die höheren Schichten an dem Kreislauf der Troposphäre keinen Anteil haben.

Die Vorgänge in der Tektonosphäre sind ihrer Art nach Bewegungen, Zustands-

<sup>1</sup> Oldham. Some new light on the origin of the Ocean. Quart. Journ. August 1907. Nach Omori F. „On the dependence of the Transit Velocity of Seismic Waves on the Nature of Path“ Bull. Earthqu. Inv. Comm. III/2 1909 S. 61 gälte allerdings für den 1. Vorläufer das Gegenteil. Da dieser viel tiefer durch die Erde geht als die Kontinente hinabreichen können, dürfte das hier unwesentlich sein.

<sup>2</sup> Die Ziffer 120 km (Hayford, Helmert) wurde hier beibehalten als die vorläufig best beglaubigte und meist angenommene Angabe. Es ist mir ganz gut bekannt, daß unter andern Annahmen höhere Ziffern berechnet worden sind, doch dürften diese Angaben, bes. von Seis-

mologen noch keineswegs endgültig sein und für uns macht die Ziffer selbst wenig aus, wenn auch 120 km etwa die untere Grenze ist. Es sei hier nur zitiert: Pilgrim L. Die Berechnung der Laufzeiten eines Erdstoßes mit Berücksichtigung der Herdtiefen, gestützt auf neuere Beobachtungen. Gerl. Beitr. z. Geophysik XII, 1913, S. 369, weil dieser seiner Schicht konstanter Wellengeschwindigkeit (100—170 km. Tiefe) einen möglicherweise physikalisch oder chemisch labilen Zustand zuschreibt. Es ist unbedingt beachtenswert, daß die Ansicht des Seismologen, von ganz anderen Gesichtspunkten ausgehend, den hier geäußerten so nahe kommt.

änderungen, chemische Umsetzungen usw., kurz eben jene Vorgänge, welche die Thermodynamik im weiteren Sinne behandelt. Zur Erläuterung des Gedankenganges wollen wir im folgenden das Beispiel des Energiehaushaltes einer derartigen in sich selbst zirkulierenden planetarischen Kugelschale, das in der Atmosphäre bzw. Troposphäre uns vor Augen liegt und ja vielfach durchsichtiger Verhältnisse zeigt, ausgiebig heranziehen.

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik, der Energiesatz fordert im wesentlichen die Aufstellung einer genauen Energiebilanz. Für unser Beispiel, die Troposphäre, wäre dies etwa wie folgt durchzuführen: die Änderungen des Zustandes der Troposphäre sind nur periodische, nach Ablauf einer vollen Periode ist ihr innerer Energiegehalt derselbe wie am Anfang derselben, davon ist nichts verbraucht worden. Energiezufuhr (Sonnen- und Erdwärme) und Energieverlust (Strahlung in den Weltraum) halten sich die Wage. Der 2. Hauptsatz, der Entropiesatz sagt im wesentlichen, von der quantitativen Formulierung abgesehen, daß die notwendige Bedingung jeglichen spontanen Geschehens das Bestehen eines Gefälles ist und daß die spontanen Naturvorgänge in der Richtung und derart verlaufen, daß der Großteil der sozusagen in Bewegung versetzten Energie von einem höheren auf ein tieferes Niveau herabsinkt, von höherer zu niedrigerer Temperatur; nur ein (nicht zu großer) Teil kann günstigenfalls in mechanische Arbeit umgewandelt werden, wie? das hängt im wesentlichen von den Eigenschaften des Materiales, in dem die Energiebewegung und -umwandlung stattfindet, ab<sup>1</sup>. In der Troposphäre beispielsweise ist maßgebend das Temperaturgefälle von unten nach oben, vom Äquator zum Pol. Die meteorologischen Vorgänge müssen dann derart laufen, daß Wärmemengen in diesen Richtungen verschoben werden. Als Energieumwandlung kommt in einer Sphäre von chemisch nicht miteinander reagierenden Gasen, von denen nur ein kleiner Bruchteil (H<sub>2</sub>O) eine Zustandsänderung durchmacht, nur die von Wärme in Bewegung in Betracht, und diese wird bestimmt durch die Gesetze der Aerodynamik.

Obwohl die Sache hier ziemlich einfach liegt, sind die strengen Lösungen noch ausständig. Um sich einen teilweisen Ueberblick zu verschaffen, erwies es sich als nützlich, gewisse Gruppen von Strömungselementen auszusondern, zusammenzufassen und mit ihnen als Hilfsgrößen weiter zu operieren. Solche Hilfsbegriffe sind Zyklone und Antizyklone. Die Zyklone ist der Raum, von dem aus ein Luftstrom emporsteigt, dem daher

<sup>1</sup> Es können hier nur diese kurzen, hoffentlich aber doch verständlichen Andeutungen gegeben werden. Bei der „Schwierigkeit der richtigen und vollständigen Anwendung der thermodynamischen Hauptsätze“ (Nernst, Theoretische Chemie 6. Aufl. 1909, S. 2) muß

bei der vorhabenden Uebersicht verzichtet werden, sie streng aufzustellen. Wenn man sie nur „richtig“ anwendet, auch ohne sie „vollständig“ auszunutzen, gewinnt man eine wertvolle Richtschnur für die Denkmöglichkeiten.

an der Erdoberfläche von allen Seiten Luft zuströmt, was durch die Erdrotation zu einem Wirbel umgeformt wird, der dem Uhrzeiger entgegengesetzt kreist (von O über N nach W). Die Antizyklone ist der Ort des absteigenden Luftstromes, allseitigen Abfließens, der Wirbel umkreist sie im Sinne des Uhrzeigers. (Es ist wichtig, im Auge zu behalten, daß diese Beschreibung das Bild wiedergibt, das sich dem Beobachter an der unteren Grenze der Troposphäre bietet, und von der andern Hälfte des Vorganges bewußt absieht. Natürlich muß die in der Zyklone zusammengeströmte und emporgerissene Luft im oberen Teil der Troposphäre wieder auseinanderströmen und umgekehrt der Antizyklone oben Luft zuströmen, diese mechanisch notwendige Ergänzung ist immer mitzuverstehen). Bei Verknüpfung dieser Grundelemente zu einem Kreislaufsystem ist nun ein von Emden<sup>1</sup> eingeführtes Ordnungsprinzip von Nutzen. Es gibt Fälle, wo Strömung und Energieaustausch sich auf einen allseits abgrenzbaren Raum beschränken. Solchen rein lokalen Energieaustausch nennt er „kurzen Zykel“; die großen Zyklonen und Antizyklonen dagegen hängen alle mehr oder minder zusammen, man kann keine Gruppe heraussondern, ohne das Ganze zu stören, ihr Energiekreislauf umspannt die ganze Erde, er bildet einen „langen Zykel“. Daß man Zyklone und Antizyklone als Kraftzentren auffassen kann, welche den ganzen Kreislauf beherrschen, ist darin begründet, daß sich dort der Energieumsatz hauptsächlich konzentriert; in der Zyklone gibt die Luft durch adiabatische Ausdehnung und Kondensation Energie ab, in der Antizyklone nimmt sie durch Umkehrung dieser Vorgänge Energie auf, der Umsatz in den Horizontalströmungen erscheint dagegen unbedeutend.

Versuchen wir nun nach diesem Muster einer planetarischen Kugelschale<sup>2</sup> den Energiehaushalt der Tektonosphäre zu analysieren. Als Energieverlust zu buchen ist in erster Linie die Wärmeabgabe an der Erdoberfläche, dann bei den orogenetischen Vorgängen die potentielle Energie der an der Oberfläche erzeugten Unebenheiten (= Arbeit, die man durch deren Einebnen gewinnen könnte), geleistete Molekulararbeit (z. B. Ueberwindung der Kohäsion durch Kataklyse) und irgend sonstige endotherme Prozesse. (Die Reibungsarbeit erscheint im System wieder als Wärme, ist also kein Verlust).

Die Wärmeabgabe von einem cm<sup>2</sup> Erdoberfläche ist nach Hann<sup>3</sup> in 1 sec. 1,716 · 10<sup>-6</sup> gr. cal., in einem Jahr 54,2 gr. cal und somit für die ganze Erde in einem Jahr 2,764 · 10<sup>20</sup> gr. cal. Setzen wir nun 30% Land mit + 700 m mittlerer Höhe und 70% Meer mit - 3700 m und die Dichte der Kruste mit 2,8 (alles ziemlich reichlich<sup>4</sup> und rechnen, da die Ziffern ohnedem ungenau sind, die Poten-

<sup>1</sup> Emden, Gaskugeln. Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische und meteorologische Probleme. Leipzig 1907.

<sup>2</sup> Warum nicht nach dem Muster der Hydrosphäre? Weil deren Bewegungen nicht autonom sind, nicht einzig durch ihren eigenen

Energieumsatz bedingt, sondern größtenteils mechanisch durch den Wind erzwungen.

<sup>3</sup> Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 2. Aufl. Leipzig 1906, S. 20.

<sup>4</sup> Krümmel, Handbuch der Ozeanographie. Stuttgart 1907, I. Bd. S. 87.

tiale einfach  $\Sigma (m g h) = \frac{1}{2} h^2 g \cdot \delta \cdot O$ , wobei h mittlere Höhe, g Schwerebeschleunigung,  $\delta$  Dichte, O Grundfläche ist, so erhalten wir für die Arbeit, die durch Abtragen der Kontinente und Auffüllen der tiefsten Ozeansenken zu gewinnen wäre, 2,66 · 10<sup>22</sup> Erg = 6,35 · 10<sup>24</sup> gr. cal. Der Vergleich mit der ersteren Ziffer zeigt, daß die von der Erde abgegebene Wärme — restlos verwendet natürlich — hinreichen würde, sämtliche Kontinente, Gebirge etc. der heutigen Erdoberfläche in nur etwa 23000 Jahren von Grund auf emporzutürmen. Es ist nicht unnützlich, dieses Größenordnungsverhältnis bei geophysikalischen Spekulationen vor Augen zu behalten. Hier mag es zur Rechtfertigung für das eingangs ausgesprochene Urteil dienen. Alle Theorien, die von thermischen Wirkungen absehen (noch unglücklicher war natürlich der Versuch, die offensichtlich thermischen Vorgänge des Vulkanismus von tektonischer Arbeit abzuleiten) müssen unzulänglich sein; denn die thermisch umgesetzten Energiemengen sind so ungeheuer, daß ein in der Gesamtbilanz kaum zu merkender Bruchteil genügt, alle tektonischen und vulkanischen Erscheinungen zu bestreiten — und wahrscheinlich sie wohl auch wirklich bestritten hat.

Gedeckt wird dieser Energieverlust der Tektonosphäre z. T. vielleicht durch Zufuhr aus dem Erdinnern, in der Hauptsache aber aus ihrem eigenen Energievorrat, u. z. durch Erniedrigung der Temperatur, durch exotherme Prozesse, unter denen die Umwandlung radioaktiver Substanzen eine große Rolle spielt<sup>1</sup>, und schließlich aus der potentiellen Energie (meistens als sogenannte Kompressionswärme eingeführt).

Für die Richtung des Ablaufes ist auch hier im wesentlichen nur das Temperaturgefälle bestimmend und zwar hauptsächlich jenes von unten nach oben. Nahe der Oberfläche sind auch in der Horizontalen starke Temperaturunterschiede. Denn einmal ist der Verlauf der äußeren Isothermenfläche sehr unregelmäßig, ferner schwankt der Temperaturgradient an der Oberfläche in weiten Grenzen (zwischen 10 und 80 m für 1° C), wegen Verschiedenheit der Leitfähigkeit und der eigenen Wärmeproduktion der Gesteine. Diese horizontalen Gradienten sind jedoch viel kleiner als der vertikale und gleichen sich gegen die Tiefe zu aus. Thermochemische Potentialdifferenzen sind jedenfalls auch vorhanden. Aber sie können nicht Ursache der orogenetischen Vorgänge sein. Im Gegenteil, die chemischen Veränderungen folgen den orogenetischen, epirogenetischen usw., also im letzten Grund der fortdauernden Energieabgabe der Erde nach außen. Spontan ablaufende Prozesse innerhalb müßten in der Zeit, da die Tektonosphäre, soweit geologisch nachweisbar, sich unter stets gleichen Verhältnissen befindet, schon längst sich erschöpft haben. In dieser Beziehung muß ungefähr Gleichgewicht herrschen, nicht gerade abstrakt chemisch betrachtet, wohl aber unter den gegebenen Verhältnissen. So sind alle vulkanischen Magmen unvollkommen oxydiert (daher wohl auch die Zone ihres Ursprungs) und würden sich, rein chemisch betrachtet, mit dem Sauerstoff der Atmosphäre spontan verbinden müssen. Tatsächlich geschieht dies aber nur dort, wo Teile der Tiefe — vulkanisch oder tektonisch — emporgebracht worden sind.

<sup>1</sup> Suess, F. E. Verschiedene Theorien über die Beziehungen der Radioaktivität zu geologischen Vorgängen. Mitt. d. Wiener geol. Ges. 1912, S. 87 ff. (Vgl. Schluß von Kap. IV).

Der heutige Zustand entspricht einem Gleichgewicht zwischen den vereinigenden chemischen und den sondernden physikalischen Kräften, demzufolge oben freier Sauerstoff vorkommen kann, obwohl unten ungenügend oxydiertes Magma liegt. Spontan (ev. katastrophal) ablaufende chemische Prozesse sind ja gelegentlich zu astro-physikalischen Hypothesen verwendet worden, dem Aktualitätsprinzip scheinen sie auch hier nicht zu entsprechen. So scheint die gut begründete Entwicklungsreihe weißer-gelber-roter Fixstern eine obigem ganz analoge Folge des fortschreitenden Energieverlustes zu sein. Daß ähnliche „Phasenwechsel“ auch im Leben der Planeten vorkommen, ist ja möglich (Dichtedifferenz zwischen innern und äußeren Planeten?), sie beanspruchen aber jedenfalls Zeiträume, welche weit jenseits des geologischen Horizontes liegen.

Nach dem Verhalten des Materials trennen wir die Tektonosphäre in eine obere und eine untere Zone. Das Material der obersten Kruste zeigt das physikalische Verhalten der festen Körper. Allein die „Festigkeit“ der Kruste darf nicht, wie es häufig geschieht, überschätzt werden. Schon die Bewegungsvorgänge, welche die Tektonik kennen gelehrt hat, passen nicht gut zu dem Bilde, das wir uns aus der alltäglichen Erfahrung von dem Verhalten eines festen Körpers machen würden.

Das Material der unteren Zone können wir für unsere Zwecke als flüssig betrachten, allerdings als eine Flüssigkeit mit großer innerer Reibung. Die Geophysik hat allerdings, besonders in neuerer Zeit andere Vorstellungen benützt, allein der anscheinende Widerspruch läßt sich leicht lösen. In der Erdbebenkunde handelt es sich um sehr kurzperiodische Beanspruchungen des Materials. Diese Erscheinungen werden durch die Theorie des vollkommen elastischen Körpers befriedigend dargestellt. Schon bei den etwas längeren Perioden (Gezeiten der festen Erde, Euler-Chandler'sche Störung) wird man, angesichts der Schwierigkeiten in Beobachtung und Berechnung, nicht behaupten können, daß die vollkommene Erfüllung der Voraussetzungen der klassischen Elastizitätstheorie sichergestellt wäre. Für andere Erscheinungsgruppen verwenden auch die Geophysiker andere Vorstellungen<sup>1</sup>. Die Erscheinungen des Vulkanismus haben schon die griechischen Naturforscher auf den nahel egenden Schluß auf ein feurigflüssiges Erdinnere gebracht; wenn das nun auch etwas zu modifizieren sein wird, so kommt der heutige Geologe, die Erscheinungen schrittweise in die Tiefe hinab verfolgend, zu recht

<sup>1</sup> Vgl. hierzu: Trabert, Lehrbuch der kosmischen Physik, Leipzig 1911, S. 557 und Rudzki, Physik der Erde, Leipzig 1911 u. z. S. 125, S. 215 „Sind wir gewiß, daß Strömungen im Erdinnern ganz unmöglich sind?“ S. 232, 239, 245. — Es scheint, daß von den Geologen der etwas unglückliche Ausdruck

„Starrheit der Erde“ manchmal mißverstanden worden ist. „Starrheit“ bedeutet einen Elastizitätskoeffizienten und hat mit der „Festigkeit“, wie sie etwa der Techniker auffaßt, direkt gar nichts zu tun. Proportionalität besteht zwischen beiden sicher nicht.

ähnlichen Schlüssen. Jeder Dünnschliff eines kristallinen Schiefers zeigt, daß die ganze Arbeit des gerichteten Druckes (und eventuell nach Becke-Grubenmanns Volumgesetz auch etliche hydrostatische Druckarbeit) in molekulare Wirkung umgesetzt worden ist. Schon in den oberen Teilen der Kruste sind also für geologische Vorgänge die Voraussetzungen der Elastizitätstheorie nicht erfüllt. Je tiefer man ins Grundgebirge hinabsteigt, desto häufiger werden die Bilder, welche man nur als Fließen beschreiben kann: Meist werden die Beobachtungen dieser Art unter das Schlagwort Plastizität eingereiht, wogegen nichts einzuwenden ist, wenn man den Begriff richtig faßt. Da das Wort aber auch vielfach dazu dient, Unklarheit und Unsicherheit zu verkleistern, vermeide ich es und sage: Das Material der tiefern Zone der Tektonosphäre reagiert auf kurzperiodische Impulse elastisch, auf dauernde Beanspruchung durch Fließen. Je kürzer die einseitige Beanspruchung dauert, desto besser passen die Bilder der Elastizitätstheorie, je länger, desto besser die der Hydrodynamik<sup>1</sup>.

Jetzt können wir die Frage nach dem Sitz der bewegenden Kräfte aufwerfen. Wie schon erwähnt, erscheinen die Bewegungen der Kruste einigermaßen fremdartig, die Bewegungsform scheint dem Material nicht völlig zu entsprechen, Energiequellen, die hinreichend und geeignet wären, sind uns in ihrem Bereiche nicht bekannt, der Schluß auf von anderswoher erzwungene Bewegung liegt nahe. Dagegen bietet die tiefere Zone anscheinend die Bedingungen, unter denen ganz wie in der Troposphäre, im Gefolge der Energieströmung, durch Umwandlung von Wärme in Bewegungsenergie auch eine materielle Strömung entstehen kann. Hier ist der Schauplatz der Energieumwandlungen, der Sitz der bewegenden Kräfte und wir bezeichnen dies mit dem Ausdruck: aktive Zone. Die Kruste dagegen ist rein passiv, ihre Bewegungen sind das Abbild der Strömungen der aktiven Zone, genauer des Strömungssystems an der oberen Grenzfläche derselben.

### III. DIE MÖGLICHEN MECHANISMEN.

Die Ableitung der mechanischen Vorgänge der Oberfläche kann auf drei grundsätzlich verschiedene Arten geschehen: Entweder man schließt jede gegenseitige Verschiebung der Massenteilchen im Erdinnern aus; dann kann das erste Ergebnis der thermodynamisch gelieferten Arbeit nur eine Deformation der Volumelemente sein und man hat durch Summation dieser unendlich vielen unendlich kleinen („infinitesimalen“) Deformationen über die ganze Kugel die Bewegungen der Oberfläche abzuleiten. Oder man läßt Massenverschiebungen im Erdinnern zu, dann sind zwei Annahmen möglich: Man sucht ihre Ursache in Störungen des hydrostatischen Gleichgewichts, darin, daß

<sup>1</sup> Diese Auffassung vertritt u. a. auch Wiechert in Göttinger Nachr. 1897 und 1907.

Druckdifferenzen in den Niveauflächen der Schwere vorhanden sind, dann ergeben sich diesen Druckgradienten folgend in der Hauptsache horizontale Ausgleichsströmungen. Oder man geht von einer instabilen Schichtung in der vertikalen Flüssigkeitssäule aus und hat als deren unmittelbare Folge die vertikalen Konvektionsströmungen. Mehr grundsätzlich verschiedene Fälle als diese drei: Deformation an Ort und Stelle, horizontale, vertikale Strömung kann es nicht geben.

Deformation an Ort und Stelle. Dieser Mechanismus erfreut sich unter dem Namen Kontraktionstheorie zweifellos des consensus plurimum und ist auch recht eingehend theoretisch durchgearbeitet worden<sup>1</sup>. Die ziffernmäßigen Ergebnisse der bisherigen Rechnungen (und dazu gehört z. B. auch die Teilung in Tensions- und Kompressionschale überhaupt) sind nicht haltbar; denn die vernachlässigten Wärmequellen (radioaktive Wärmeproduktion, Kompressionswärme) sind von gleicher Größenordnung wie die in Rechnung gezogenen. Doch will ich auf diesem Einwand nicht allzusehr bestehen, denn die Thomson'sche Rechnung kann, wenn auch vielleicht mit Schwierigkeiten, richtig gestellt werden. Da man von der Verteilung der Ausgangstemperatur und der Radiowärme, Zustandsgleichung und Leitfähigkeit nichts weiß, sollte es wohl gelingen, durch passende Annahmen die Rechnung für die Oberfläche zum Stimmen zu bringen; ein Erfolg, der allerdings nur die Uebungsbücher der mathematischen Physik um eine lehrreiche Aufgabe bereichern würde.

Ein schwererwiegender Einwand gründet sich auf die innern Widersprüche in der Methode und die Unzulässigkeit der notwendigen Hilfshypothesen: Erklärt werden sollen die großen Massenverschiebungen an der Oberfläche, welche, wie die neuere Tektonik zu erkennen gelehrt hat, die Oberflächenschichten derart gebogen und gefaltet, ausgewalzt, gezerrt und wieder gestaucht, ja gelegentlich verknietet und durcheinander gemischt haben, daß das Bewegungsbild der handgreiflichen Festigkeit und Sprödigkeit des Materials Hohn spricht und seinesgleichen nur im Verhalten plastischer bis halbflüssiger Massen findet. Und in der Tiefe, wo die Gesteine nach allen Annahmen nahe ihrem Schmelzpunkte und ungemein plastisch sein müssen, sollte Aehnliches ausgeschlossen sein, keinerlei strömungsartige Massenverschiebung statthaben? Similia insimilibus? Das scheint als Leitschnur für eine Erklärung doch nicht vorteilhaft zu sein.

<sup>1</sup> Thomson und Tait, Handbuch der theoretischen Physik, deutsch von Wertheim, Braunschweig 1871, S. 434 und Nachfolger. Gerade die einfachste und klarste Darstellung bei Hergesell, Die Abkühlung der Erde und die Gebirgsbildenden Kräfte. Beitr. z. Geophy-

sik Bd. II, S. 153 ff. Stuttgart 1895, hat gar keine Verbreitung gefunden. Und doch ist diese Darstellungsweise am besten geeignet, die Wirkung von Aenderungen in den Annahmen zu überblicken und zu schätzen.

Ferner: Aus den Annahmen der Kontraktionshypothesen kann eigentlich nur eine über die ganze Erdoberfläche gleichmäßig verteilte, die ganze Zeit durch gleichmäßig fortschreitende Wirkung erklärt werden. Die zu erklärenden Erscheinungen zeigen das genaue Gegenteil, ihr Wesen ist der Wechsel von Hebung und Senkung, von Stauung und Zerrung nach Raum und Zeit. Gegeben wird eine hauptsächlich zentripetal wirkende Kraft, die beobachteten Bewegungen sind jedoch nur zum kleinern Teil ebenfalls zentripetal, zum andern tangential und zum dritten sogar zentrifugal. Es ist offenbar eine Selbsttäuschung, wenn man glaubt, durch die Kontraktionshypothese etwas „erklärt“ zu haben, man hat nur das Problem ein Stück weiter geschoben, auf die Hilfsmechanismen, welche man zur Realisierung hat erfinden müssen. Am besten scheinen noch die langsamen epirogenetischen Bewegungen der Kontinente und Ozeane zu dem vorgeschlagenen Bilde zu passen, insbesondere wenn man, wie Suess, die Anomalie zentrifugaler Bewegungen dadurch beseitigt, daß man das Vorkommen solcher überhaupt bestreitet. (Da die Geologie ein absolutes Vergleichsniveau nicht geben kann, ist diese Anschauung nicht zu widerlegen; was mit der Richtigkeit etwa ebensoviel zu tun hat, wie ein Freispruch wegen mangelnden Beweises mit der Unschuld des Angeklagten). Die an Größenordnung etwas zurückstehende, aber dem Sinne nach unleugbar relativ und absolut zentrifugale Massenbewegung des Vulkanismus wird meist nicht im Zusammenhang damit betrachtet, so daß die Verlegenheit weniger auffällig wird. Man kann daher die Lava-Massen des Untergrundes ruhig durch die einsinkenden Schollen (oder den Tangentialdruck u. ähnl.) aufpressen lassen, ohne zu bedenken, daß dieses Einsinken etc. ja nur die Folge davon ist, daß fraglicher Untergrund vorher verschwunden ist, also jedenfalls nicht mehr ausgepreßt werden kann und braucht. Das steht ja in einem andern Kapitel des Lehrbuches. Davon, daß die Suess'sche Horsttheorie wohl auch bei genauerem Nachprüfen noch einige Hilfsannahmen über Festigkeit usw. nötig hat, wollen wir jetzt absehen, da diese dieselben sind wie die bei den Faltengebirgen zu besprechenden. Allein mit der allgemeinen oder teilweisen Absenkung kann man nur eine stauende Tangentialkraft ableiten, und zwar einen gleichmäßig zunehmenden Druck. Damit kann man die Entstehung eines Zerrungsfeldes nicht erklären<sup>1</sup> und dafür, daß sich dieser Tangentialdruck nicht mehr gleichmäßig verteilt, sondern an schmalen

<sup>1</sup> Einen ernstgemeinten Versuch zur Erklärung obiger Anomalien hat meines Wissens nur Rothpletz unternommen: („Ueber die Möglichkeit, den Gegensatz zwischen der Kontraktions- und Expansionstheorie aufzuheben“). Sitz. Ber. Akad. d. W. München Bd. 32, 1902 S. 311 ff.) Allerdings beruht dieser einzig auf einem Mißverstehen der Ritter'schen ther-

modynamischen Deduktionen und nimmt nur dadurch eine Ausnahmestellung in der Geschichte der Geologie ein, daß nicht, wie seit Lyell (s. Thomson und Tait S. 437) die Geologen häufig taten, gegen den 1. Hauptsatz verstoßen wird, sondern zur Abwechslung gegen den 2. (den Entropiesatz).

Faltungszonen und zwar nach stets längeren Pausen relativer Ruhe in geologisch kurzer Zeit zur Auslösung kommt, braucht man neue Hilfhypothesen. Gewöhnlich beruft man sich auf die Festigkeitsunterschiede. Das Vorhandensein solcher wird aber stets nur behauptet, irgend ein Beweis, den man für greifbare Sachen — ob z. B. der Granit des Schwarzwaldes wirklich fester als der des Simplon oder Aarmassivs ist — doch fordern muß, ist bisher nicht versucht worden. Die landläufige Behauptung, daß ein gefaltetes Krustenstück fester als ein ungefaltetes sei, widerlegt sich durch die technische Erfahrung, daß ein Erd- oder Gesteinskomplex, in dem sich einmal Rutschflächen ausgebildet haben, d. h. Bewegungsbahnen ausgearbeitet worden sind, stets schwächer ist und bleibt, als der ungestörte. Ferner zeigt eine einfache Ueberlegung, daß bei den hier in Betracht kommenden Kräften die Molekularkräfte (d. i. Festigkeit) einen nur ganz geringen für das Gesamte fast unwesentlichen Bruchteil ausmachen können.<sup>1</sup>

Die Festigkeit der Erdkruste genügt nicht, einen Schub um ihren ganzen Umfang weiterzuleiten, nicht einmal um Kontinentbreite.<sup>2</sup> Daher kann unmöglich der ganze

<sup>1</sup> Dafür, daß die Molekularkräfte (Kohäsion usw.) bei Körpern planetarischer Größe nur eine sehr geringe Rolle gegenüber den sie bewegenden Kräften spielen, kann ich mich auf das Zeugnis zweier bedeutender Astrophysiker berufen. So sagt G. H. Darwin (Ebbe und Flut, 2. Aufl. Täubner 1911, S. 326) mit Bezug darauf, daß ein kleiner Satellit bei einer gewissen Annäherung an seinen Planeten durch die fluterzeugende Kraft derselben auseinandergerissen werden müßte: „Die Größe, für welche die Kohäsion genügt, um eine Masse zusammenzuhalten, ist gering im Vergleich mit dem kleinsten Satelliten.“ Und Clerk Maxwell betreffend die Saturnringe (citiert ebendort, S. 331): „wenn wir die ungeheure Größe der Ringe im Vergleich mit ihrer Dünne betrachten (d. i. unter 400 oder 500 km), so wird die Absurdität der Behandlung derselben als feste Körper von selbst einleuchtend. Ein Eisenring von solcher Größe würde nicht nur plastisch, sondern halbflüssig sein unter dem Einfluß der hier auf ihn wirkenden Kräfte.“ Die Längendimensionen der Saturnringe sind etwa das 10 bis 20fache der Erddimensionen, die Größenordnung der

Schwerebeschleunigung — somit auch die der andern wirkenden Kräfte — liegt zwischen der an der Erdoberfläche und  $\frac{1}{5}$  davon. Die großen Krustenstücke der Erde (Kontinentaltafeln z. B.) können daher sehr wohl mit verstehenden Beispielen verglichen werden und auch für sie muß das Urteil des Physikers gelten, daß ihnen irgend eine nennenswerte Formfestigkeit, wie wir sie einem festen Körper gefühlsmäßig zuschreiben, nicht zukommt.

<sup>2</sup> Da Ampferer's („Ueber das Bewegungsbild von Faltengebirgen“ J. R. A. 1906) Ausführungen das Schicksal des propheta in patria gehabt haben, sei hier der Physiker Rudzki angeführt (Physik der Erde, Leipzig 1911, S. 244). Bei einer Kontinentaltafel von 100 km im Geviert“ wäre der zur Ueberwindung der Reibung nötige Druck mehr als anderthalb mal so groß als die Druckfestigkeit, d. h. die Gesteinsscholle würde sich nicht vom Fleck rühren, sondern in Stücke zerbrechen“. D. h. die tektonischen Wirkungen eines Tangentialdruckes würden nicht am Rand des „starren Schildes“ auftreten, sondern mitten drinnen!

Betrag der Umfangsverkleinerung der schrumpfenden Kugel einer oder zwei Faltungszonen zugutekommen. Und gar die Aufspeicherung der Spannung, wachsend durch Jahrtausende, bis sie in einer Gebirgsbildungsperiode ihre Auslösung findet! Tatsächlich zeigt die Beobachtung, daß gegenwärtig die Tangentialspannungen fort-dauernd in Makro- und Mikrotektonik umgesetzt und damit verbraucht werden (einerseits in die bei Erdbeben vielfach beobachteten Schollenverschiebungen, andererseits in Umformung der Gesteinsstruktur.) Ein gewisser Rest von Spannung kann ja jeweils verbleiben, aber wie soll sich das aufsummieren?

Diejenigen Theorien, welche sich nur das Ziel stecken, einzelne orogenetische Vorgänge aus rein lokalen Ursachen zu erklären, die also nach der hier angewendeten Ausdrucksweise als gemeinsames Merkmal den kurzen Zyklus aufweisen, würden von einem Teil obiger Einwände nicht getroffen werden. Auf einzelne kann hier nicht eingegangen werden, bei Nachprüfung wird man jedoch finden, daß die meisten ein weiteres gemeinsames Merkmal aufweisen: die ungenügende Dotierung der Aktivseite der Energiebilanz. Und dann bleibt immer noch die Frage offen, warum irgend ein verhältnismäßig geringer Energieaustausch zur Bewirkung der beobachtbaren tektonischen Vorgänge genügt, der unvergleichliche größere Energiemengen umsetzende Energiehaushalt der Erde als Ganzes aber so ganz ohne mechanische Nebenwirkungen ablaufen soll. Den Vorrang, den die Kontraktionstheorie diesen kleinlichen Spielereien gegenüber immer gewonnen und behauptet hat, verdankt sie jedenfalls dem in ihr enthaltenen, wenn auch bis jetzt noch nicht bewußt herausgearbeiteten Gedanken des langen Zyklus, daß nämlich der Energiehaushalt der Erde als Ganzes betrachtet werden muß.

Damit ist nun die Annahme strömungsartiger Massenverschiebungen in der Tektonosphäre unabweisbar geworden. Solche können entstehen als Ausgleichsströmung wegen Störung des hydrostatischen Gleichgewichts und als Konvektionsströmung wegen instabiler thermischer Schichtung. Die Druckgradienten in der Horizontalen, welche die Folge einer Abweichung der Flächen gleicher Dichte von den Niveaulächen der Schwere sind, bilden gewiß eine mögliche, ja sogar sicher auch eine tatsächlich wirkende Ursache von solchen Strömungen<sup>1</sup>. In den Mittelpunkt der Theorie können sie aber nicht gestellt werden. Der ihnen zu Gebote stehende Energievorrat ist gering und erschöpft sich schnell (wie alle kurzen Zyklen). Das Problem des Ortes er-

<sup>1</sup> Anscheinend vertrat diese Ansicht G. von dem Borne („Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien“, Geol. Beitr. z. Geophysik, Bd. IX. S. 378 ff. 1908), wenn ich den etwas dunkeln Aufsatz richtig verstanden

habe, und im Grunde ist das auch der Kernpunkt der Theorie von Lachmann („Über den Bau alpiner Gebirge“ Z. d. deutsch. geol. Ges. 1913, Monatsber. S. 137).

ledigt sich natürlich durch die Annahme ad hoc, daß dort, wo tektonische Wirkung zu beobachten ist, auch der Druckgradient im Untergrund anzutreffen sein muß. Für Geosynklinalküsten z. B. wird man dies ohne weiteres zugeben können. (Allerdings geht dann der Ausgleichsstrom vom Land zum Meer, während die Ueberfaltung, der „einseitige Schub“, meist vom Meer zum Land hin erfolgt.) Allein auf das Problem der erdumspannenden Zusammenhänge, des Zusammenhanges von Gebirgsbildung und Vulkanismus wird keine Antwort gegeben und eine Aufspeicherung von Spannung während der tektonischen Ruhezeiten ist noch weniger denkbar als bei der Kontraktionstheorie. Nun wird man ein Strömungssystem von rein nur horizontalen Strömungen in der Natur kaum antreffen. Hat man aber ein Netz von ineinander verflochtenen horizontalen und vertikalen Strömungen, so zeigt die Prüfung des Betrages der Energieumwandlungen, daß letztere das eigentlich aktive Element vorstellen. Und darum muß unsere Betrachtung von den vertikalen, den „Konvektionsströmungen“ ausgehen. Sie stellen das eigentliche Treibgewicht vor. Womit gar nicht übersehen werden soll, daß im Kreislauf jedes Ringstück in gewissem Grade gleich wichtig, weil notwendig, ist und daß ein Großteil der sichtbaren Wirkung (die Stauung) unmittelbar auf die horizontalen Stücke des Stromsystems zurückgeht und erst mittelbar auf die vertikalen.

#### IV. INSTABILE THERMISCHE SCHICHTUNG. KONVEKTIONSSTRÖMUNG.

Wir denken uns eine schwere Flüssigkeit in vollkommenem Gleichgewicht: Druck, Temperatur und Dichte im gleichen Niveau überall gleich, variierend nur in der Senkrechten und zwar nehme die Temperatur nach abwärts zu. Die Flüssigkeit sei homogen, d. h. die Dichte wird nur durch Druck und Temperatur bestimmt.

Es werde nun ein Teilchen inmitten herausgegriffen und isoliert gedacht (etwa durch ein undurchlässiges aber vollkommen nachgiebiges Häutchen). Dieses isolierte Teilchen werde ein kleines Stück in die Höhe geschoben; so kommt es unter geringeren hydrostatischen Druck, dehnt sich adiabatisch aus und kühlt sich ab. (Ausnahmefälle, wie Wasser von 4° C, schließen wir hier aus.) Ist die adiabatische Abkühlung ebenso groß wie die Temperaturdifferenz zwischen dem Anfangsniveau und dem erreichten, so wird die Dichte des Teilchens gleich dem des Flüssigkeitsteilchens sein, das es hier verdrängt hat. Daher ist der hydrostatische Auftrieb auch nach der Verschiebung gleich seinem Gewicht, es herrscht abermals Gleichgewicht, zu einer Weiterbewegung ist kein Anlaß. Wir sagen: die thermische Schichtung ist indifferent und bezeichnen die entsprechende Temperaturdifferenz (Zunahme in Grad Celsius pro cm nach abwärts) als den kritischen Temperaturgradienten. Ist die adiabatische Abkühlung größer, als die Temperaturdifferenz zwischen Anfangs- und Endlage, so ist das verschobene Teilchen kälter, also spezifisch schwerer als das verdrängte, der Auftrieb geringer als sein Gewicht; es

wird in die Anfangslage zurücksinken müssen, die thermische Schichtung ist stabil. Ist aber endlich die adiabatische Abkühlung geringer als die Temperaturdifferenz zwischen Anfangs- und Endniveau, so ist das gehobene Teilchen wärmer, also spezifisch leichter als das verdrängte, der Auftrieb größer als das Gewicht, es wird weiter steigen müssen. Wird unter solchen Umständen durch einen kleinen Anstoß eine Bewegung eingeleitet, so stellt sich das Gleichgewicht nicht wieder her, sondern die Bewegung muß fortgehen: die thermische Schichtung ist instabil.

Dieselbe Schlußreihe gilt auch, mutatis mutandis, wenn die erste Verschiebung nach abwärts erfolgte, auch dann muß bei instabiler Schichtung die einmal eingeleitete Bewegung weitergehen — nach abwärts. Es hängt somit von der Richtung des ersten Anstoßes ab, ob ein aufsteigender oder ein absteigender Konvektionsstrom an irgend einer Stelle entsteht. Die Bedingung für beide ist die gleiche, daß nämlich der vertikale Temperaturgradient größer als der kritische ist.

Die Temperaturdifferenz zwischen dem adiabatischen Teilchen und der ruhenden Flüssigkeit (und damit der Auftrieb) ist naturgemäß bei einer kleinen Verschiebung sehr klein. Beim zweiten Schritt wiederholt sich aber das gleiche Spiel, nur daß das Teilchen schon wärmer ist, als seiner Anfangslage entsprechen würde. Somit wachsen Temperaturdifferenz, Auftrieb und bewegende Kraft beim Weitergehen der Bewegung. In einer begrenzten Flüssigkeit sind nun nur geschlossene Strömungskreise möglich. Das Maximum an bewegender Kraft würde bei einem solchen erreicht, der aus zwei vertikalen und zwei horizontalen Stücken zusammengesetzt wäre, welche letztere so lang sind, daß die durchströmende Flüssigkeit jedesmal auf die Temperatur des betreffenden Niveaus erwärmt bzw. gekühlt werden müßte, und wäre gleich der Differenz zwischen den Gewichten der Flüssigkeitssäule des kalten absteigenden und des warmen aufsteigenden Konvektionsstromes. Wegen der Energieverluste durch Mischung und Wärmeleitung wird dieses Maximum nie ganz erreicht, doch darf man diese wohl nicht zu hoch einschätzen. Denn z. B. die Beobachtung der Fallwinde der Atmosphäre zeigt, daß in ihnen fast genau der theoretische Gradient von 1° C auf 100 m Höhendifferenz herrscht, wie er ganz ohne Verluste sein müßte und man würde doch hier gerade die Mischungsverluste eher recht beträchtlich erwartet haben.

Zu beachten ist ferner, daß der Konvektionsstrom die Grundlagen seiner Existenz selbst untergräbt. Er schafft Wärme von unten nach oben, erwärmt also die Umgebung des oberen Teiles des Kreislaufes, kühlt die Tiefe, bis der Temperaturgradient auf den kritischen herabgedrückt ist; dann hat auch die Strömung ein Ende. Ohne äußere Einflüsse muß der Verlauf folgender sein, wenn die Schichtung einer Flüssigkeitsmasse instabil geworden ist: auf irgend einen äußeren Anstoß setzt die Strömung ein, zuerst ganz schwach, nimmt ziemlich schnell zu, bis zu einem gewissen Höhepunkt, auf dem

sie sich eine Zeit lang hält, und klingt dann allmählich ab, je mehr sich die thermische Schichtung dem indifferenten Gleichgewicht wieder nähert.

Wenn in der vertikalen Flüssigkeitssäule nicht nur Temperatur- sondern auch Materialverschiedenheiten (ursprüngliche Dichtedifferenzen) herrschen, so wird die Einfachheit der Beziehungen stark gestört. (So kann z. B. reines kaltes Wasser stabil auf warme Salzlösung geschichtet sein: Siebenbürgische Salzseen). Es fragt sich daher, was wir in dieser Beziehung von der Tektonosphäre zu erwarten haben. Von der Geophysik haben wir hier wenig Unterstützung zu erhoffen. Dichte Gesetze für das Erdinnere hat man ja genug aufgestellt, allein die Oberflächendichte wurde dabei meist nach willkürlicher Schätzung angenommen<sup>1</sup>. Die geologischen Annahmen gehen nun dahin, daß in den obersten Erdschichten eine schnelle Dichtezunahme stattfindet, derart, daß die äußerste Rinde ungefähr die Zusammensetzung eines mittelsauren Eruptivgesteins, die nächstfolgenden Schichten die eines sehr basischen hätte, Suess' Sal und Sima<sup>2</sup>. Diese Trennung dürfte im allgemeinen mit der zwischen der passiven Kruste und der aktiven Zone der Tektonosphäre zusammenfallen, natürlich nicht als scharfe Grenze, sondern als allmähliche Durchaderung und Durchmischung. (Als nicht unwichtig wollen wir den Nebenumstand hervorheben, daß die basischen Schmelzen viel geringere Viskosität zeigen, als die sauren, was jedenfalls der Beweglichkeit der aktiven Zone zugute kommt.) Wenn dem so ist, kann die Dichte in der Simazone nur mehr langsam zunehmen; denn zunehmen muß sie fortwährend (Bedingung der Stabilität), aber es muß innerhalb der durch die Durchschnittsdichte des Erdkörpers von 5,5—5,6 gegebene Grenze noch Raum zu jenen beträchtlichen Dichtesprüngen bleiben, welche uns die Forschungen Wiecherts und seiner Schüler kennen gelehrt haben. Zum gleichen Ergebnis führt folgende Ueberlegung: die Isostasie fordert, daß jede Massenverschiebung an der Oberfläche durch eine äquivalente der aktiven Zone kompensiert wird. Weil also und insoweit diese durch derartige Kompensationsströmungen durcheinander gemischt wird und seit geologisch alten Zeiten gemischt worden ist, können große stoffliche Unterschiede, d. i. primäre Dichtedifferenzen nicht bestehen.

Als Normal- und Ruhezustand der Tektonosphäre betrachten wir das indifferente („konvektive“) Gleichgewicht, das, wenn es jeweils ins labile geändert wurde —, durch Konvektionsströmungen stets wieder (wenigstens annähernd) hergestellt wird. Das ist

<sup>1</sup> Selten, daß dies als Mangel überhaupt gefühlt worden ist wie von Helmert („die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie“, Leipzig 1884 Bd. II S. 476) daß hier ein wichtiges Problem vorliegt, ist niemandem noch aufgefallen. Allerdings kann

man es mit den Mitteln der Geophysik (Schweremessung) nicht gut angreifen.

<sup>2</sup> Sueß, Ed. Ueber Einzelheiten in der Beschaffenheit einiger Himmelskörper. Sitz.-Ber. Akad. Wien I, 1907 S. 1555 ff.

für einen Himmelskörper, der durch Zusammenballung ursprünglich weiter zerstreuter Teile entstanden gedacht wird, wirklich das gegebene<sup>1</sup>; denn die Ballungswärme wird hauptsächlich in den inneren Teilen entwickelt, der Strahlungsverlust betrifft die Oberfläche, der Temperaturgradient muß somit fortwährend größer werden.

Denken wir den Ruhezustand (indifferentes Gleichgewicht) in irgend einem Zeitpunkt für die Tektonosphäre realisiert, d. h. es herrsche von der Grenze zwischen passiver Kruste und aktiver Zone durch diese nach abwärts durchwegs der kritische Gradient. Wärmeabgabe nach außen wird zuerst an der obern Grenze den Gradienten über den kritischen erhöhen, mit fortschreitender Abkühlung dringt auch die Instabilität gegen die Tiefe vor.

Hier ist die Thomson'sche Abkühlungsrechnung am Platz. Dieser Vorgang entspricht im Wesentlichen ihren Annahmen. Allerdings liefert sie dann nicht das Alter der Erde, sondern die Zwischenzeitdauer zwischen zwei orogenetischen Umwälzungen als jene Zeit, welche die Abkühlung braucht, um Instabilität bis zu jenen Tiefen zu tragen, bis zu welchen sie nach den geophysikalischen Daten vor der Auslösung der Bewegung gedrungen war. Das wird ungefähr die Ausgleichstiefe sein, aber nicht ganz; denn der einsetzende Konvektionsstrom verschiebt dadurch, daß er den tiefsten Teil seines Kreislaufes kühlt, den überkritischen Gradienten noch ein Stück nach unten. Auch rein mechanisch wird er wohl ein Stück nach der Tiefe weitergreifen. Vorbehaltlich genauer rechnerischer Untersuchung möchte ich doch vermuten, daß eine von diesen Gesichtspunkten ausgehende Schätzung mit den Zeitangaben der Radiumforschung der Größenordnung nach in Einklang zu bringen sein wird.

Es braucht nun keineswegs sofort mit der Abkühlung die Bewegung einzusetzen; denn der Zustand ist ja doch ein Gleichgewicht, wenn auch ein labiles. Können doch selbst in der so leicht beweglichen Atmosphäre instabile Temperaturschichtungen einige Zeit bestehen bleiben. Da in der Tektonosphäre große Reibungswiderstände vorhanden sind, dagegen die Dichtedifferenzen viel geringer ausfallen als in einer Gaskugel, so ist eine lange „Unterkühlung“ möglich, bis dann ein Anstoß genügt, die Bewegung in Gang zu bringen.

Die Dauer der Ruhezeiten zwischen den einzelnen Umwälzungsperioden ist offenbar umso größer, je größer die innere Reibung und um so kleiner, je größer der Wärmeverlust nach außen ist. Wir wissen nun, daß die Sonnenflecken, (die ja im wesentlichen auch nichts anderes als Konvektionsströmungszyklonen sind) eine Periode von ca. 11 Jahren haben. Die Sonne besteht nun aus Gas (wenigstens die dafür in Betracht kommenden Schichten sicher) und verliert auf 1 cm<sup>2</sup> Oberfläche in 1 sec. 3,078 gr. cal. also fast zwei Millionen mal soviel als die Erde. Es ist daher gar nicht ver-

<sup>1</sup> In dieser thermodynamischen Hinsicht kann ich zwischen den allgemeiner angenommenen Gaskugeltheorien und der besonders von amerikanischen Geologen vertretenen „Planetesimaltheorie“ nicht jenen großen Unterschied finden, den Chamberlin behauptet. („On

Bearings of radioactivity on Geology“ Journ. of Geol. 1911, vol. XIX, No. 8.) Ob Moleküle oder größere Teilchen zusammengeballt werden, macht offenbar für die Umrechnung von Energie der Lage bezw. der Bewegung in Ballungswärme gar nichts aus.

wunderlich, wenn die analogen Perioden auf der Erde (die orogenetischen) nach Millionen von Jahren zu bemessen sind. Eher möchte man aus dieser Parallele fast schließen, daß der Unterschied im Wärmeverlust fast allein schon die Proportion in den Zeiten aufklärt und daher die Reibung in der Tektonosphäre gar nicht so groß sein könne.

Das Wesen dieser periodischen Umwälzung, das Zurückfallen aus dem labilen in ein neues indifferentes Gleichgewicht liegt darin, daß die tieferen Schichten der Tektonosphäre gekühlt, die höhern erwärmt werden, oder daß durch die Konvektionsströmungen eine gewisse Wärmemenge vom höhern aufs niedrigere Temperaturniveau transportiert wird. Das Quantum an Energie, das derart transportiert wird, muß ungeheuer sein, denn setzen wir auch die Unterkühlung sehr vorsichtig an, so kommt doch dabei die ganze Wärmekapazität einer über 100 km dicken Kugelschale in Rechnung. Von diesem Quantum steht nach dem II. Hauptsatz der Wärmelehre ein gewisser Bruchteil zur Umwandlung in mechanische Arbeit zur Verfügung. Dieser Bruchteil (der sog. Wirkungsgrad) dürfte gar nicht so klein sein; denn unsere thermodynamische Maschine arbeitet mit großem Temperaturintervall und der Konvektionsstrom selbst entspricht im Prinzip dem idealen Carnot'schen Fall, auch die Verluste dürften nicht allzu groß sein (Reibung wird z. B. wieder als Wärme zugute gebracht). Zu einer Berechnung von Gesamtenergie oder Wirkungsgrad fehlen uns leider noch die Anhaltspunkte. Aber man wird kaum behaupten können, daß diese Energieumsetzungen ihrer Größenordnung nach ungenügend scheinen, die beobachteten tektonischen und vulkanischen Erscheinungen hervorzubringen. Jedenfalls hat bis jetzt keine andere Theorie größere Energiemengen zur Verfügung stellen können.

Damit gelangen wir sofort zu einer Schätzung der Geschwindigkeit der Bewegung: Der Konvektionsstrom wird nur dann die vorerwähnte Wärmestauung zu beseitigen imstande sein, wenn der Wärmetransport durch ihn wesentlich schneller geschieht als durch Leitung. Ich glaube, daß man ruhig einen Unterschied um eine ganze Größenklasse annehmen kann, daß also die Wärmeleitung neben der Konvektion vernachlässigt werden darf. Das scheint aus der kurzen Dauer wirklicher orogenetischer Aktivität im Verhältnis zur Dauer der Ruhezeiten hervorzugehen. Ebenso überlegen an Geschwindigkeit muß die Strömung gegenüber der Diffusion sein, sonst wären die schroffen Unterschiede in den geförderten Magmen nicht möglich. Eine Anknüpfung an Näherliegendes finden wir im Verhältnis zur Erosion. Auch diese wird meistens glatt überrannt.

Weniger übersichtlich gestaltet sich die Diskussion, wenn man die radioaktiven Vorgänge in Betracht zieht. Den Fall, daß die von ihnen erzeugte Wärme den Gesamtverlust der Erde übersteigt, können wir ausschließen; denn die Folge davon wäre eine Erhöhung von Gradient und Temperatur an der Oberfläche, solange bis eben alle erzeugte Wärme abfließt und das hätte in der langen Zeit des Bestehens der Erde schon erreicht werden müssen.

Für den Fall stationären Wärmegleichgewichtes, daß erzeugte und ausgestrahlte Wärme sich die Wage halten, haben wir zwei Möglichkeiten ins Auge zu fassen. Entweder: der Temperaturgradient ist kleiner als der kritische, dann läge gar keine Ursache zu irgend welchen thermischen oder mechanischen Veränderungen vor. Da ein solcher Zustand völliger Ruhe nicht besteht oder in geologischen Zeiten bestanden hat, trifft dies nicht zu. Oder der Gradient ist größer als der kritische, dann müßte der Mechanismus der Konvektionsströmungen fortwährend in Gang bleiben, etwa wie in einem Topf, unter dem fortwährend geheizt wird. Dem widerspricht die geologische Erfahrung, daß lange Zeiten tektonischer Ruhe sich zwischen die Umwälzungen einschieben. Denkbar wäre allerdings folgendes: der kritische Gradient ist überschritten, wenn die radioaktiven Elemente und damit ihre Wärmeproduktion gleichmäßig verteilt sind. Würden sie aber emporgeschafft und etwa in der Kruste bis zur obern Grenze der aktiven Zone konzentriert, so würden sie eine Art Wärmeschirm bilden, der Gradient in der aktiven Zone unterhalb könnte bis zum kritischen herabgehen, und damit Ruhe eintreten. Die bloße Konvektionsströmung kann dies allerdings nicht leisten, möglich wäre aber eine solche Aufwärtskonzentration, wenn irgend welche chemischen Affinitäten ein Ausfallen der radioaktiven Substanzen gegen die Erdoberfläche zu begünstigen würden. Dafür kann man mancherlei anführen, so den größeren Radiumgehalt der sauren Eruptivgesteine gegenüber dem Durchschnitt der basischen, der Pegmatite besonders und ähnlicher (dann wäre der heutige Oberflächengradient abnorm hoch und als Nachwirkung der letzten orogenetischen Periode anzusehen). Während der nun folgenden Ruheperiode diffundiert Radium wieder in die aktive Zone, aus der Kruste zurück und (besonders wenn man den Anschauungen von Arrhenius folgt) aus dem Erdkern, wo es durch endotherme Prozesse gebildet worden ist: neue Instabilität durch Erhöhung des Gradienten über den kritischen und die Konvektionsströmungen einer neuen orogenetischen Periode würden abermals eine Sonderung herbeiführen. Allerdings müßten wir dann annehmen, daß inzwischen der radioaktive Wärmeschirm der vorhergegangenen Umwälzung so ziemlich verbraucht wäre, was mit dem analytischen Befund an alten (archaischen) Gesteinen nicht vereinbar ist, oder uns mit dem Gedanken einer jedesmaligen Temperatursteigerung in der aktiven Zone vertraut machen.

Auch diese Annahme würde eine Periodizität der orogenetischen und vulkanischen Ereignisse bedingen und könnte mit den hier entwickelten Gedankengängen wohl in Einklang gebracht werden. Allein, da hier fast alles nur auf Vermutungen beruht, wollen wir von der einfachsten ausgehen, daß nämlich die radioaktive Wärmeproduktion den Verlust nur zum Teil deckt. Es tritt dann eine wirkliche Abkühlung der oberen Schichten ein, natürlich langsamer, als dies sonst der Fall wäre. Dadurch würden die Zeiten tektonischer Ruhe verlängert, und das ist schließlich bei den großen Zeiträumen, mit denen wir hier rechnen müssen, ganz annehmbar.

Eine weitere Komplikation bringen die thermochemischen Vorgänge, welche den Druck- und Temperaturänderungen in der auf- und absteigenden Masse folgen. Für die vorhabende allgemeine Übersicht können wir aber davon absehen, wir müssen nur im Auge behalten, daß dann unser Begriff des kritischen Gradienten bestimmt wird durch die adiabatische Zustandsänderung der gegebenen stofflichen Kombination, also auch durch die erwähnten chemischen Vorgänge. (Ein Beispiel aus der Meteorologie: er wäre ein anderer für feuchte, als für trockene Luft).

#### V. DAS STRÖMUNGSSYSTEM DER KUGELSCHALE.

Wäre die Ursache der Bewegung, die instabile Schichtung auf einen bestimmten Raum beschränkt, so würde daraus ein kurz geschlossen ausgleichendes Strömungssystem folgen. Solche Fälle sind denkbar und dürften bei manchen vulkanischen Ereignissen auch realisiert sein. Allein, die Grundursache, der Wärmeverlust nach außen, betrifft die ganze Erdoberfläche ziemlich gleichmäßig; wir haben keinen Grund zu extremen Annahmen über örtliche Verschiedenheiten der Wärmeabgabe und der thermodynamischen Eigenschaften des Untergrundes; dagegen ist es wahrscheinlich, daß die an der Oberfläche nebeneinander vorhandenen Gegensätze sich gegen die Tiefe ausgleichen, die in verschiedener Wärmeabgabe an der Oberfläche begründeten wegen der Eigenart der Wärmeleitung, die stofflichen aber wegen häufiger Durchmischung der aktiven Zone. So werden zu dem Zeitpunkt, da ein Anstoß die Maschine in Gang setzt, nicht isolierte Flecken, sondern große Teile, wenn nicht die ganze Tektonosphäre, in labilem Gleichgewicht sich befinden. Schon wegen der gleichen Sachlage würden große Gebiete, welche die höchste Instabilität aufweisen, sich wahrscheinlich ohnedem fast gleichzeitig in Bewegung setzen, jedenfalls werden sie mitgerissen, sobald die Bewegung irgendwo eingeleitet ist, etwa rein mechanisch durch die Reibung, oder auf dem Umweg über die Polschwankung, oder durch jene Besonderheiten der Strömung, welche ein die ganze Kugel umspannendes Strömungssystem (einen langen Zykel) zu bilden bestrebt sind (z. B. Kontinuitätsbedingung).

Nach Analogie mit der Troposphäre werden wir im Strömungssystem zu unterscheiden haben: Antizyklonalgebiete: Konvektionsstrom aufsteigend, oben Abströmen nach allen Seiten, Wirbelbewegung im Sinne des Uhrzeigers; Zyklonalgebiete: Konvektionsstrom absteigend, oben Zuströmen von allen Seiten, Wirbelbewegung gegen den Uhrzeiger; Füllflächen, auf denen vertikale Strömungen fehlen, nur horizontale oder gar keine Bewegung vorhanden ist. (Die Bezeichnungsweise weicht einigermaßen von der in der Meteorologie gebräuchlichen ab; vollkommener Parallelismus ist wegen des grundsätzlich verschiedenen Standpunktes, einmal an der oberen, das andere mal an der unteren Begrenzungsfläche der Kugelschale nicht zu erzielen). Geologisch sind die

Antizyklonalgebiete die der Vulkane und Zerrungen, die Zyklonalgebiete die der Kettengebirge, der Stauung und Faltung, und die Füllflächen der Großteil der Kontinente und Ozeane, die nur indirekt von den orogenetischen Vorgängen in Mitleidenschaft gezogen werden.

Im Vergleich zu dem Strömungssystem der Troposphäre scheint das der letzten orogenetischen Vorgänge (Kreide-Tertiär) in der Tektonosphäre bedeutend einfacher, da die komplizierten Vorgänge in der Hauptsache auf zwei schmale Gürtel, den mediterranen und den pazifischen Kreis beschränkt sind, während viel größere Flächen von einheitlicher Horizontalströmung oder gar von ruhenden Massen eingenommen sind. Eine gewisse Begründung liegt darin, daß in der Tektonosphäre einer der großen Gegensätze der Troposphäre — Pol und Äquator — wegfällt oder doch ziemlich unwesentlich wird. Auch dürfte der Einfluß der von der Differenzierung der Oberfläche ausgeht, für eine Kugelschale von 120 km Dicke nicht so scharf zum Ausdruck kommen, wie für eine von nur 10 km. Man kann auch ganz allgemein vermuten, daß ein Energieaustausch über die ganze Erdoberfläche, ein langer Zykel, immer nach relativ einfachen Formen strebt, wenn auch eine allgemeine Behandlung dieses Strömungsproblems noch aussteht.

Übrigens dürfte kein Mangel sein an mannigfaltigen kleinen Störungen, welche sich den großen Zügen des Vorganges überlagern. Einesteils werden die in Kap. III als Störung des hydrostatischen Gleichgewichts gekennzeichneten Druck- und Dichtedifferenzen im Strömungssystem mitbestimmend wirken — das ist der ihnen zuweisende Platz und ihre gebührende Rangordnung — andernteils werden im Gefolge der großen Wirbel lokale Energieaustausche (kurze Zykel) auftreten, etwa wie unsere Sommergewitter am Rande der großen Zyklone.

Eine Parallele mit der Troposphäre besteht darin, daß die Zyklone bedeutend schärfer ausgesprochen ist, als die Antizyklone: sie ist auf einen schmalen Raum begrenzt, daher die intensiven Wirkungen der Stauung, während die Antizyklone, nach Verteilung der Vulkane zu urteilen, breiter ist und die Zerrung sich auch über die Füllflächen weitererstreckt. Ebenso scheint die Zyklone in beiden Sphären beweglicher und variabler zu sein als die Antizyklone; denn in den meisten genauer untersuchten Faltengebirgen ist ein Wandern der Faltung festgestellt, während ein analoges Wandern des Vulkanismus zum mindesten nicht so deutlich ausgesprochen ist.

Wie sich Stauung und Zerrung dem Ausmaß nach zu einander verhalten, also der absolute Betrag der Kontraktion, das ist für unsere Anschauungsweise nicht wesentlich. Darum schadet es nicht, daß wir vorläufig wenig Genaueres darüber wissen. Daß die Stauung durch die Zerrung in weitgehendem Maße ausgeglichen wird, ist allerdings

sicher<sup>1</sup>, doch glaube ich, daß als Gesamtergebnis eine Verkleinerung der Oberfläche sich ergeben wird, weil physikalisch doch am naheliegendsten und natürlichsten mit Abkühlung sich Volumverringern, mit Energieverlust eine Verminderung der potentiellen Energie verbindet<sup>2</sup>, allerdings eine wesentlich geringere Verkleinerung, als man bisher angenommen hat.

#### VI. DER EINFLUSS DER DREHUNG DER ERDE.

Infolge der Drehung der Erde wird jeder auf ihr bewegte Körper von der Richtung des Anfangsimpulses abgelenkt, so als ob eine besondere Ablenkungskraft aufzutreten würde. Diese ablenkende Kraft ist der Geschwindigkeit der Bewegung proportional. Für langsame Bewegungen wird sie absolut genommen sehr klein, allein deswegen darf sie doch nicht vernachlässigt werden; relativ ist ihre Wirkung bei kleiner Geschwindigkeit größer und nicht kleiner als bei größeren Geschwindigkeiten. Ein im Horizontalniveau bewegter Körper wird derart auf der nördlichen Halbkugel stets nach rechts abgelenkt. Gesezt, daß die von einer Zyklone angesaugten Teilchen auch ganz haarscharf gegen deren Mittelpunkt in Bewegung gesetzt würden, so könnten sie dieselben doch nicht erreichen, sie treffen alle daneben, jedes rechts von seiner Impulsrichtung: es entsteht ein von O über N nach S, also entgegen dem Uhrzeiger kreisender Wirbel (und um die Antizyklone ein Wirbel von entgegengesetztem Drehungssinn)<sup>3</sup>.

Umgekehrt muß jede Massenverschiebung, welche auf der Erde vorgenommen wird, auch ihre Rotation beeinflussen, sowohl Geschwindigkeit als Lage der Drehungsachse im Erdkörper ändern, und da dieser, wie die Beobachtung von Gezeiten der festen Erde zeigt, sich dem neuen Kräftesystem anpassen muß, auch eine Deformation der ganzen Erdkugel bedingen. (Eine einfache Ueberlegung auf Grund des Energiesatzes zeigt, daß es verfehlt sein muß, Änderungen der Rotation als Hauptursache orogenetischer Vorgänge anzusprechen; denn erstere treten nie spontan, sondern stets als Folge eines woanders stattgefundenen tektonischen Vorganges auf und können eben nur so viel Energie liefern, wie dieser an sie abgegeben hat — abzüglich der durch die Deformation des Erdkörpers verlorenen Arbeit, was sicher zu wenig ist. Eine bereits vorhandene arbeitsfähige Energie auszulösen, dürfte es aber genügen.)

Setzen wir nun den Fall, daß das instabile Gleichgewicht der Tektonosphäre in einem begrenzten Gebiete durch irgend einen Anstoß (wovon später) umgeworfen wird, so

<sup>1</sup> Vgl. Quiring, Die Entstehung der Schollengebirge. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges. 1913, S. 418.

<sup>2</sup> Vgl. Trabert, Lehrbuch der kosmischen Physik, Leipzig 1911, S. 562.

<sup>3</sup> Eine sehr ausführliche und klare elementare Darstellung dieser mechanischen Probleme findet man bei Trabert, Lehrbuch der kosmischen Physik, 1911, S. 114—143.

beeinflusst die hier entstandene Massenbewegung auf dem Weg der Beeinflussung des Drehungszustandes der Erde und der daraus folgenden Deformation in gewissem Grade jedes Teilchen des Erdkörpers. (Am stärksten wird die Deformation an nachgiebigeren Schwächstellen des Körpers zum Ausdruck kommen und wir haben geophysikalische Andeutungen, daß eine solche in oder nahe an der Tektonosphäre liegt<sup>1</sup>). Bei jenen Teilen der Tektonosphäre, die sich ebenfalls im labilen Gleichgewicht befinden, ist schließlich jeder Impuls geeignet, sie in Bewegung zu setzen und dieser ist von der sonst vorkommenden periodischen durch gleichmäßiges Anhalten und größere Stärke ausgezeichnet. Dadurch wird bewirkt, daß die einzelnen, sozusagen tektonisch prädisponierten Gebiete sich nicht einzeln unregelmäßig nacheinander in Bewegung setzen, wie es kleine Unterschiede ihrer thermischen Verhältnisse und Zufälligkeiten der Auslösung bedingen würden, sondern alle gleichzeitig, so daß wir gesonderte tektonische Phasen erkennen können, die sich einheitlich über größere Erdräume erstrecken, und daß alle gleichzeitigen orogenetischen Bewegungen sich zu einem die ganze Erde umspannenden System, einem langen Zyklus, zusammenschließen müssen.

Die bisherigen Rechnungen ergeben zwar nur recht geringfügige Polverschiebungen. So berechnet Norbert Herz („Die Eiszeiten und ihre Ursachen“ Wien 1909 S. 281) für die Erhebung des Himalaya eine Verschiebung des Trägheitspoles um rund  $2'' = 60$  m, und von ähnlicher Größenordnung sind auch die meisten andern Angaben. Die beobachtbare Polschwankung bleibt sogar meist unter  $0,2''$ . Dabei wurden aber immer nur die tektonischen Verschiebungen sichtbarer Massen in Rechnung gezogen. Da diese nach unserer Anschauung nur ein kleiner Bruchteil der die Erdkruste bis 120 km Tiefe erfassenden Strömung sind, wären diese Ziffern jedenfalls zu vervielfachen und ist die Möglichkeit beträchtlicherer Polverschiebungen nicht von vornherein auszuschließen.

Damit soll in der umstrittenen Frage der Polverschiebungen keineswegs einseitig Stellung genommen werden. Wir folgern nur, daß in den Gebirgsbildungsperioden die Schwankungen der Pollage größer sein werden, als wir sie heute beobachten. Ob aber bei der Summierung der vielfach widerstreitenden Einflüsse ein Rest bleibt, ob sich dauernde Verschiebungen des Pols ergeben, ist für uns hier nicht wesentlich und kann offene Frage bleiben. Angesichts der Anordnung von Faltengebirgen und Vulkanen auf nahezu größten Kreisen, werden wir von vornherein vermuten müssen, daß die Einwirkungen auf die Rotation der Erde sich zum größten Teile gegenseitig aufheben. Besonders, da wir häufig beobachten, daß spontanes Fortsetzen einer erzwungenen Bewegung im gleichen Mechanismus der ersten Ursache entgegenarbeitet. Hiefür ein leicht übersichtliches Beispiel: Im Äquatorialgebiet A entstände ein aufsteigender Konvektionsstrom (der Rest des Kreislaufes werde so disponiert, daß er vernachlässigt werden kann.) Dann verringert das die Winkelgeschwindigkeit der Erde. In einem instabilen Gebiet B., ebenfalls am Äquator, muß das als Impuls nach unten wirken, also ein absteigender Konvektionsstrom entstehen, der die Erdrotation beschleunigt, also dem in A entgegenarbeitet.

<sup>1</sup> Zu diesem noch keineswegs völlig geklärten Problem vergleiche man die Arbeiten von Schweydar in Beitr. z. Geoph. Bd. IX 1903

und Veröffentl. d. Kgl. preuß. geodät. Inst. 1910 und 1912.

Die eben angedeuteten Gedankengänge führen zu einigen nicht uninteressanten Ausblicken. Erstens ist durch einen derartigen mechanischen Zusammenhang die Gleichzeitigkeit der einzelnen Akte einer orogenetischen Phase verbürgt, so liefert dies eine wertvolle Kontrolle der palaeontologischen Zeitrechnung, welche eine solche die ganze Erde umspannende genaue Gleichzeitigkeit nicht verbürgen kann. Ferner hängen Drehungssinn und Intensität der Wirbelbewegung von der Lage zur Drehungsachse ab und ebenso das Wandern der Wirbel. (Recht merkwürdig ist doch, daß in den Alpen mehrfach die Faltung von W nach O zu wandern scheint (so am Südrand), ebenso wie die atmosphärischen Zyklonen unter unsern Breiten; in mehr äquatorialen Gegenden kehren sie bekanntermaßen in O-W-Zugrichtung um), das würde eine absolute Bestimmung der Pollage zulassen, was der Geologie bis jetzt nicht möglich ist. Allerdings ist noch viel Arbeit zu tun, in Beobachtung und Theorie, bevor man an eine Behandlung dieser Probleme auch nur wird denken dürfen.

#### VII. ANTIZYKLONE UND VULKANISMUS.

Die Erscheinungen des Vulkanismus haben seit jeher zur Vorstellung eines feurig flüssigen Erdinnern geführt, was durch Analogie mit verschiedenen Ansichten der Astrophysik weiter unterstützt worden ist. Auch als neuere Theorien, auf unleugbar gewichtigen geophysikalischen Tatsachen fußend, die „Starrheit“ der Erde forderten, mußte hier eine Ausnahme zugestanden werden. Wurde auch die Erde als Ganzes fest angenommen, so sollten in ihrer Panzerdecke isolierte Lavabassins, „Maculae“, peripherische Herde usw. von glutflüssigem Magma vorkommen können. Diese scharfe Gegensätzlichkeit zwischen Teilen der Tektonosphäre, welchen eine eminent flüssige Natur zugestanden wird und der Hauptmasse, die man ebenso bestimmt als festen Körper bezeichnete, scheint aber in den Tatsachen nicht begründet. Nach dieser Annahme müßte das elastische Verhalten einer solchen Lavamakula gegenüber der festen Umgebung völlig verschieden sein: Folge davon Störungen des seismischen Verhaltens im Umkreis, soweit der Einfluß von Brechung, Beugung, Absorption der Wellen durch besagte Makula, sowie der Eigenschwingung der auf ihr schwimmenden Decke sich eben bemerkbar machen würde. Da solche Lavabassins nicht allzu klein sein könnten, würden davon ziemliche Flächen betroffen werden, da sie nicht allzu tief liegen können, würde die Störung genügend scharf abgegrenzt und akzentuiert sein, und da schließlich in Vulkangebieten— wenigstens in einigen mehr als Durchschnitt — reichlich seismische Stationen liegen, hätte eine solche Schirmwirkung bereits beobachtet werden müssen. Da dies nicht der Fall ist, müssen wir schließen, daß der dialektisch so scharf herausgearbeitete Gegensatz physikalisch nicht in diesem Maß besteht, daß der Untergrund der Vulkangebiete sich gegenüber den Erdbebenwellen wenig anders verhält als

die übrige Erdkruste. Im ersteren Falle sind Strömungen, insbesondere auch Konvektionsströmungen nachgewiesen. Es liegt somit gar kein Grund vor, die Möglichkeit solcher für die restliche Tektonosphäre zu bezweifeln.

Einordnung des Vulkanphänomens ins Gesamtströmungssystem: Massentransport von unten nach oben, gewöhnlich vereint mit Bruch- und Zerrungsgebiet an der Oberfläche entspricht in unserer Bezeichnungsweise der Antizyklone, dem aufsteigenden Konvektionsstrom. Im einzelnen wären die Vorgänge etwa folgendermaßen zu denken:

In einer Masse, die im Konvektionsstrom aufsteigt, nimmt die Temperatur und besonders der Druck ab. Daraus resultiert eine Verschiebung der chemischen Gleichgewichte, die dahin führen wird, daß sich das Magma entmischt, und ein Bestandteil ausfällt, wobei im allgemeinen zwischen beiden Teilen eine Differenz im spezifischen Gewicht statthaben wird (wahrscheinlich sogar eine ziemlich bedeutende, da die Tendenz zur Volumvergrößerung vorherrscht: Extrem die Ausscheidung von freien Gebläschen.) Der Entstehung nach sind anfänglich beide Bestandteile fein durcheinander gemengt (nach Art einer Emulsion) allein die Oberflächenspannung begünstigt das Wachsen der größeren, das Zusammenfließen benachbarter Bläschen zu Tropfen usw. Ist derart einmal eine größere Blase des leichteren Bestandteiles zusammengeflossen, so steigt sie vermöge ihres hydrostatischen Auftriebes von selbst. Sie folgt der Hauptströmung nicht mehr dort, wo diese an der oberen Grenze der aktiven Zone ins horizontale umbiegt, sondern steigt weiter und bahnt sich durch Drängen, Schieben, Aufschmelzen ihren eigenen Weg aufwärts durch die passive Kruste<sup>1</sup>.

Dort, wo der aufsteigende Konvektionsstrom ins Horizontale umbiegt, beginnt er gleichzeitig sich pinienartig in den Antizyklonalwirbel auszubreiten. Derart entsteht an der Grenze zwischen aktiver Zone und passiver Kruste ein trichterförmiger toter Raum, welcher, nachdem das ursprüngliche Füllmaterial in den Horizontalstrom hinausgedrängt worden ist, von den aus der Axe des Wirbels selbständig weitersteigenden Blasen des leichteren Differentiationsbestandteiles gefüllt wird. Der Chemismus dieses Urmagmaherdes ist einigermaßen schwankend, da einerseits die Zufuhr sich etwas ändern kann, andererseits von Zeit zu Zeit sekundäre große Blasen leichteren Materials von ihm wieder abgespalten werden, die dann selbständig ihren Aufstieg sich weiter bahnen. Diese (vielleicht erst nach einer oder mehreren Zwischenstufen) sind es, welche den sogenannten Vulkanherd bilden, und das ausgestoßene vulkanische Material das derart ausgesiebte leichteste Produkt der ganzen Differentiationsreihe. Ob es die Oberfläche erreicht oder unterirdisch erstarrt, hängt von den Umständen ab (Tempera-

<sup>1</sup> Vgl. hierzu Friedlaender, I. Über hydrostatisches Gleichgewicht bei Vulkanen, diese Zeitschr. III/1, S. 1 ff. 1916.

tur, Viskosität, Chemismus bes. bez. freiwerdender Gase, Gesamtmasse usw.) Man sieht, daß im wesentlichen und guten dies den von Stübel entwickelten Gedankengängen entspricht, nur daß an Stelle der unhaltbaren Panzerwände die Gleichgewichtsverhältnisse einer längere Zeit gleichmäßig anhaltenden Strömung gesetzt sind. Damit kann man, sowohl der Mannigfaltigkeit der vulkanischen Produkte, als der andernfalls beobachtbaren Einheitlichkeit oder gesetzmäßigen Folge Rechnung tragen. Aus vollkommen gleichbleibendem Grundstrom muß bei gleichem Gang der Differentiation stets das gleiche vulkanische Produkt sich ergeben. (Oder dieselbe Reihe von Produkten; denn es können mehrere Bestandteile der Primärblasen der Reihe nach eruptionsfähig werden. Die nächste aufsteigende Primärblase gibt dann eine „Rekurrenz“). Andererseits können an sich ganz kleine Schwankungen der Zusammensetzung des Grundstromes und kleine Abweichungen im Gange des Differentiationsprozesses bei so komplizierten Gleichgewichten, wie sie ein Magma darstellt, schon wesentlich verschiedene Endprodukte liefern. Eine naheliegende Ursache einer Änderung des Differentiationsverlaufes ist der Wechsel in der Strömungsgeschwindigkeit, der sofort in eine ganz andere Druck-Temperaturkurve hineinführt. Nach Kap. III muß aber im Konvektionsstrom grundsätzlich die Geschwindigkeit anfangs schnell zunehmen, gegen das Ende zu langsam absinken; weitere Schwankungen können durch Änderung im Gesamtströmungssystem bedingt werden (z. B. durch Wandern von Zyklone und Antizyklone). Man sieht, daß für die Deutung der chemischen Verhältnisse des Vulkanismus ein weiter Spielraum gegeben wird.

Vorgänge der geschilderten Art müssen natürlich ungemein lange Zeiträume in Anspruch nehmen. Denn die hemmenden Kräfte (innere Reibung, Wärmeverluste, Festigkeit der Kruste u. s. w.), sowie die zu bewegenden Massen (ein hohes Vielfaches der an der Oberfläche in Erscheinung tretenden Eruptiva) sind sehr groß, die sondernden

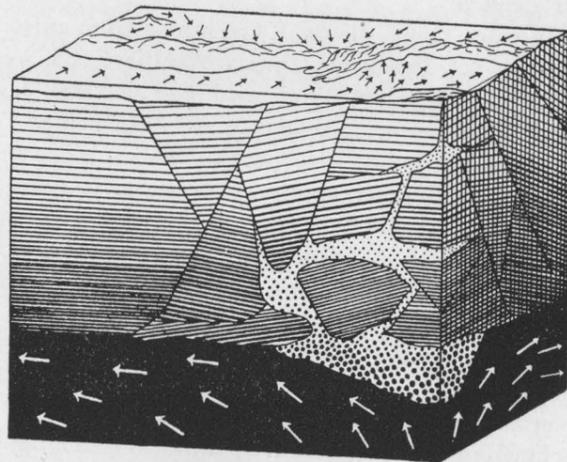


Fig. 1. (Im Durchschnitt). Vulkanische Antizyklone weiße Pfeile: Strömung der aktiven Zone; punktiert: Vulkan Magma; die Schraffen deuten die Zerrungstektonik an. (Oberfläche) schwarze Pfeile: Richtung des gebirgsbildenden Schubes, von den 2 Vulkan-Antizyklonen zu der Zyklone des Faltengebirges, die an der Knickung vertieft gedacht wird (Wirbel gegen den Uhrzeiger).

Kräfte etwa von Größenordnung der Oberflächenspannung, also nicht außergewöhnlich. Die Bewegung der aktiven Zone wird bereits lange im Gang sein müssen, bevor die erste Eruption die Erdoberfläche erreichen kann. Andererseits werden aber noch lange, nachdem diese Bewegung und damit der Zuschub aufgehört hat, in den gewaltigen Ur- und Zwischen-Magmaansammlungen die Differentiationsvorgänge weiterlaufen, allein schon deswegen, weil sie ihre abnorm hohe Temperatur (die thermische Tiefenstufe kann in Vulkangebieten unter 10 m für 1° C sinken) auf das normale Maß der Krustentemperatur herabsetzen müssen, und daher wird die vulkanische Tätigkeit die tektonische wesentlich überdauern. (Posthumer Vulkanismus.)

Rufen wir uns nochmals das Bild des pinienartig sich nach oben ausbreitenden, aufsteigenden Konvektionsstromes vor Augen, so sehen wir, daß die Vulkane allerdings wahrscheinlich in Zerrungszonen der Erdkruste liegen werden; daß aber kein Grund dafür vorhanden ist, daß das Maß der Zerrung gerade in der Nähe der Eruptionen am größten sein müßte. Denn da sich die Antizyklone, (ebenso wie die der Atmosphäre) gleichmäßig und weit ausbreitet, verteilt sich die Zerrung über große Flächen. Man könnte eher vermuten, daß gerade über dem Zentrum des Wirbels die zentrifugale zerrende Kraft gering ist. Daß das aufdrängende Magma angetroffene Schwächen zonen ausnützt wird, ist ja selbstverständlich, darf aber nur als Element der Lokaltektonek gewertet werden. Weiter auf die viel umstrittene „Spaltenfrage“ der Vulkane einzugehen, ist unnötig.

Aus der gegebenen Darstellung wäre ferner zu folgern, daß das Zentrum der Antizyklone, weil Ansammlung spezifisch leichteren Materiales, eine gewisse isostatische Hebung erfahren muß. Das steht zwar mit der landläufigen Ansicht, welche Vulkane und Senkungsfelder verbindet, nicht im Einklang. Allein jene stützt sich weniger auf Beobachtungen als auf eine noch dazu mechanisch mangelhaft durchdachte Auffassung der Kontraktionstheorie. Beobachtungen über vulkanische Hebungen sind sehr häufig, absolut genommen oder doch relativ zur Umgebung<sup>1</sup>. Wenn man bedenkt, daß der Zerrung eine Verdünnung der Kruste, also eine Senkung der Oberfläche entspricht, welche von vornherein außer Rechnung gebracht werden müßte, muß man diesen Fällen erhöhtes Gewicht beilegen. Statistisches Material, welches zur Entscheidung dieser Frage ausreichen würde, steht mir allerdings nicht zur Verfügung.

Es kann nun die Frage aufgeworfen werden, ob die Richtigkeit der hier entwickelten geophysikalischen Gedankengänge nicht wenigstens in einigen Punkten durch Beobachtungen an tätigen Vulkanen nachgeprüft werden könnten? Ganz analog der für das Vulkanphänomen im großen gegebenen Erklärung müssen wir annehmen, daß auch

<sup>1</sup> Für die Auffassung der Vulkane als Hebungs- zentren hat sich neuerdings wieder v. Lozinski („Vulkanismus und Zusammenschub“,

Geol. Rdsch. Bd. IX, Heft 3—6) eingesetzt. Ueber die von ihm berührten Zusammenhänge wird auch später (Kap. XIII) zu sprechen sein

der einzelne Eruptionsakt dadurch eingeleitet wird, daß sich im Magmareservoir eine Blase leichteren Materials bildet, welche dann infolge hydrostatischen Auftriebs nach oben drängt und dank der Energie, die beim Steigen besonders durch Gasentwicklung frei wird, durch die Kruste durchdringt. Geophysikalisch kann man diesen Vorgang auch als Entstehen und Wachsen eines Massendefektes bezeichnen und dies wäre theoretisch durch geodätische Messungen (der Schwerebeschleunigung und der Lotablenkung) kontrollierbar. Zum Zwecke einer oberflächlichen Schätzung können wir den Massendefekt ruhig als Kugel ansehen, damit wir die einfachste Formel Helmerts anwenden können<sup>1</sup>. Wir setzen den Radius der Kugel  $a = 1000$  m; das Volum der Kugel ist somit  $4,2 \text{ km}^3$  und wenn die sichtbare Förderung  $\frac{1}{200}$  davon wäre, so beträgt dies  $20 \text{ Mill. m}^3$ , was sicher ziemlich hoch gegriffen für einen gewöhnlichen Vulkanausbruch erscheint. Die Dichtedifferenz zwischen dem ursprünglichen bzw. verbleibenden Magma und dem abgespaltenen sei  $s = 0,22$  oder wenn  $s_m$  die mittlere Dichte der Erde bedeutet  $\frac{s}{s_m} = -0,04$ . Die Tiefe des Kugelmittelpunktes sei  $t = 10$  km, sehr wenig, da wir selbst mit einer Tiefenstufe von  $10$  m für  $1^\circ \text{ C}$  am Kugelrand erst auf  $900^\circ \text{ C}$  kommen. Schließlich bedeute  $R = 6370$  km den Erdradius. Dann haben wir als Maximalwerte der

$$\text{Schwerestörung: } \delta g \text{ max} = \frac{a^3 s}{t^2 R \cdot s_m} \cdot g = \frac{-1}{-16\,000\,000} g \text{ (direkt überm Zentrum).}$$

$$\text{Lotablenkung: } \Delta \text{ max} = \frac{2}{3 \sqrt{3}} \cdot \frac{a^3 s}{t^2 R \cdot s_m} = -0,005'' \text{ (7 km vom Zentrum horizontale Entfernung).}$$

Obwohl die Dimensionen recht reichlich bemessen wurden, entziehen sich diese Störungsbeträge sicherlich einer direkten Messung. Dagegen würde ein passend eingestelltes Horizontalpendel auf Lotschwankungen dieser Größenordnung noch reagieren. Wie es scheint, liegen solche Beobachtungen auch bereits vor.<sup>2</sup> Ich glaube, daß die vor dem Vulkanausbruch an den Seismographenhorizontalpendeln beobachteten Bodenneigungen keine reelle Bewegung des Bodens, sondern eine derartige Störung des Lotes vorstellt. Planmäßige Untersuchungen in dieser Hinsicht wären sehr wünschenswert, insbesondere da dadurch eine zuverlässige Voraussage von Eruptionen ermöglicht würde. Die Schwierigkeiten wären allerdings nicht gering, da ein derart fein eingestelltes Horizontalpendel auf vielerlei Einflüsse reagiert. Aber durch Vergleich benachbarter Stationen kann man vielleicht solche allgemeinere Störungen eliminieren. Die bleibenden Veränderungen der Massenverteilung müßte man mit der Eötvös'schen Drehwage, dem einzigen Instrument von genügender Empfindlichkeit nachprüfen, die Veränderungen der Oberfläche durch Nivellement.

<sup>1</sup> Helmert, Höhere Geodäsie Bd. II, S. 266—277. Bd. IV, Heft 1, S. 83.

<sup>2</sup> Vgl. hierzu Friedlaender in Z. f. Vulkanologie.

Eine andere Vorhersagung der Eruption würde sich darauf gründen, daß nach Beginn der Sonderung das Magmareservoir eine Art galvanisches Element darstellen muß; denn irgendeine elektrische Potentialdifferenz wird zwischen den beiden Bestandteilen wohl immer bestehen und das Magma ist zur Leitung genügend ionisiert. Die Folge dieser Ströme wäre eine Störung des magnetischen Feldes der Erde, die zuerst stark wechselt und ein gleich bleibendes Maximum einige Zeit vor der Eruption erreicht. Das Signal wäre hier ja wohl noch empfindlicher, die Deutung auf bestimmte Bewegungsvorgänge aber viel schwerer als bei den Horizontalpendelbeobachtungen.

#### VIII. ZYKLONE UND FALTENGEBIRGE.

Das wesentlichste Merkmal der sogenannten Falten- oder Kettengebirge ist die Stauung der Erdkruste, d. h. wir finden auf einem verhältnismäßig schmalen, scharf begrenzten Streifen die Gesteine, welche ursprünglich einen bedeutend breiteren Raum bedeckt haben müssen, zusammengedrängt, gefaltet, übereinander geschoben, ja stellenweise förmlich durcheinander geknetet. Daß die Zifferangaben über das Maß des Zusammenschubes im einzelnen Falle noch recht erheblich schwanken, macht weniger aus, störender ist, daß die Vorstellungen über die Art des Vorganges noch keineswegs geklärt sind. Sicher und unbestritten ist nur, daß der Mantel der Sedimente, der in den prädestinierten Faltungszonen (den Geosynklinalen) stets besonders mächtig entwickelt ist, sowie seine nächste kristalline Unterlage ganz außerordentlich zusammengedrängt worden ist. Rein geometrisch sind nun nur zwei Vorstellungen möglich: entweder diese oberste  $10$  km nur selten übersteigende Krustenschicht hat sich mechanisch von der Unterlage völlig gelöst und gleitet auf dieser „wie die Schale einer Orange“. (M. Bertrand). Der Kern verkleinert sich ohne relative Verschiebung seiner Teile (infinitesimale Deformation Kap. III) die gleitende dünne Schale überträgt die gesamte Verkürzung des Umfanges einzig auf die schmale Faltenzone. Daß eine derartige Uebertragung des aus der Kontraktion folgenden Seitenschubes um einen ganzen Erdring physikalisch unmöglich ist, haben wir bereits nachgewiesen, eine spezielle bewegende Kraft, die dies vermöchte, ist auch nicht auffindbar.

Somit bleibt nur die Annahme übrig, daß die Unterlage sich mindestens ebensoviel verschmälert hat, wie der sie ursprünglich deckende Sedimentstreifen zusammengeschoben worden ist. Dagegen, daß die Kontraktion gerade hier lokalisiert worden wäre, sprechen die gleichen Gründe wie oben. Auch ist eine solche Verschmälerung nicht möglich ohne eine Vervielfachung der ursprünglichen Dicke. Da ein Ausweichen nach oben nicht stattgefunden hat, im Gegenteil die Synklinen des Deckgebirges tief nach abwärts greifen, muß das überschießende Volum nach abwärts befördert worden sein. Bis hierher ist die Schlußkette völlig frei von hypothetischen Annahmen. Nach den gemachten Voraussetzungen werden wir nun den Abtransport dieser Massen dem ab-

steigenden Konvektionsstrom zuschreiben, der derart den freien Raum schafft, in den von beiden Seiten die Horizontalströmung eindringt, auf ihrem Rücken die Krustentafeln mittriftend, die sich nunmehr über dieser „Verschluckungszone“ wie die Schollen einer Eispressung übereinander türmen müssen: die Verschluckungszone des Faltengebirges (Ampferer) entspricht der Zyklone unseres Strömungssystems.

An diesem Zusammenhang: Faltengebirge — Verschluckungszone — Zyklone ist unbedingt festzuhalten, wenigstens soweit es sich um große selbständige Faltengebirge — solche 1. Ordnung sozusagen handelt; Faltungerscheinungen 2. Ordnung können auch anderweitig entstehen, sei es durch den abscherenden, von einer benachbarten Stauungszone 1. Ordnung übertragenen Seitendruck („Abscherungsdecke“ des Jura. Buxtorf) oder durch ungleiche Bewegungsausmaße in einem Schollenland („Saxonische Faltung“ Stille). Diese sekundären Faltungen ohne eigenes Kraftzentrum, sind aber schon an Größenordnung, Erscheinung und Struktur meist leicht zu erkennen. Ein weiteres Kennzeichen ist, daß sie keinen Massendefekt zeigen (Jura), wenigstens nicht in den scharf profilierten Zügen der Faltengebirge 1. Ordnung.

Ort, Richtung, Geschwindigkeit und Mächtigkeit des Stromes bestimmt sich aus den jeweilig in den Zuständen der aktiven Zone gegebenen Vorbedingungen. In manchem scheint jedoch die Strömung eigenen Gesetzen zu folgen. So ist es klar, daß die Mächtigkeit eines Konvektionsstromes eine gewisse untere Grenze hat, unter der das Verhältnis der bewegenden Kraft zur Reibung und sonstigen Energieverlusten so ungünstig wird, daß eine Bewegung nicht aufrecht erhalten werden kann; mit zunehmender Größe scheinen die Verhältnisse fortwährend günstiger zu werden. Und doch scheint es auch eine obere Grenze für die Ausdehnung des Gebietes zu geben, das von einer einheitlichen Zyklone erfaßt werden kann; denn eine breite Geosynklonale wird gewöhnlich nicht mit einem Male, sondern erst in mehreren Zugriffen von der Faltung bewältigt, das lehrt uns die Geschichte der genauer untersuchten großen Faltengebirge. Ob hier vielleicht ähnliche Umstände mitspielen, wie bei der „Reibungstiefe“ der Meeresströmungen? Der Ort der Zyklone ist durch die unmittelbare Wirkung, die Verschluckungszone des Faltengebirges gekennzeichnet, also ein langer schmaler Streifen. Es ist nun ganz gut möglich, daß dies dem Querschnitt des absteigenden Konvektionsstromes entspricht. Ebenso gut kann man aber denken, daß dieser Streifen nicht mit einem, sondern nach und nach von einer Zyklone mehr rundlicher Gestalt hinabgezogen wurde, welche längs des Streifens weiterwanderte, wie die atmosphärischen Minima längs ihren Zugstraßen. Diese Frage müssen wir offen lassen. Nur einen Umstand können wir mit ziemlicher Sicherheit feststellen, daß nämlich die Zyklone in Bezug auf die Längsachse der Geosynklonale nicht symmetrisch ist. Diese bezeichnet nämlich eine Grenzzone zwischen zwei Krustenstücken von sehr verschiedenem physikalischen Verhalten und die vom Kontinent zufließenden Horizontalströmungen werden sich von den aus dem Ozeanraum kom-

menden in vielem unterscheiden, insbesondere in der Höhenlage; denn unter dem Kontinent reicht die passive Kruste tiefer hinab als unter dem Ozean; dadurch entsteht ein drehendes Kräftepaar, welches die Falten der Oberfläche einheitlich nach der einen Seite überlegt, vom Meer zum Land: der viel berufene „einseitige Schub“.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit der Erkenntnis der Strömungsvorgänge liegt darin, daß wir nicht sie selbst beobachten, sondern nur die von ihnen bewegte Kruste und auch da nicht den zurückgelegten Weg selbst, sondern nur Anfangs- und Endlage bestenfalls kennen. Auch ist uns der Bewegungsvorgang in tieferen Zonen (Faltenstockwerken) der Kruste zur Zeit erst ganz ungenügend bekannt. Nur in den größten Zügen dürfen die in unserer Tektonik ein Abbild der Strömungen der aktiven Zone zu finden hoffen. Die Uebertragung der Bewegung von der aktiven Zone auf die Kruste erfolgt durch eine Art Friktionskuppelung, die bewegende Kraft ist die Reibung der strömenden Masse der aktiven Zone an der Unterseite der Krustenschollen. Es ist besonders hervorzuheben, daß diese Art der Kraftübertragung an die (so problematische) Festigkeit der Kruste bei weitem geringere Ansprüche stellt, als die bisher gebräuchliche, welche den Schub an dem schmalen Querschnitt als Normalkraft angreifen ließ. Allerdings wird man auch die Bewegungsbilder sämtlich revidieren müssen; wie ich glaube mit Nutzen. Z. B. denkt man derart eine durch Tangentialreibung an der Unterfläche bewegte elastische Tafel mit der Stirnkante gegen ein Hindernis stoßen, so hat man sofort wieder ein drehendes Kräftepaar, welches die Tafel in Falten zu legen strebt und zwar in unsymmetrische nach rückwärts überkippte Falten — genau der Südalpenrand! Dies scheint jedenfalls einfacher als die Smoluchowski'sche Erklärung, welche übrigens, da sie fragliches Drehmoment nicht hat, keinen Grund für die Asymmetrie der Falten zu geben weiß. Aus unserer Vorstellung folgt die Asymmetrie der Falten als Regel — genau wie man es beobachtet.

Wie oben bereits erwähnt, können wir die bei der Faltung tätigen Kräfte auf ein Kräftepaar zurückführen. Die in höherem Niveau angreifende Komponente desselben drängt die obersten Schichten der Kruste einseitig überfaltend zusammen und türmt so an der Erdoberfläche aus Falten, Schuppen und Decken das Gebirge auf. Gleichzeitig muß die zweite Komponente, von gleicher Größe, aber tiefer angreifend die tieferen Krustenschichten einer ganz analogen Umformung, jedoch mit entgegengesetztem Bewegungssinn, unterwerfen. Die tektonischen Formen mögen, den verschiedenen Verhältnissen (Belastung, Plastizität) entsprechend, beträchtlich anders ausfallen, das Ausmaß, in welchem dieses sozusagen reziproke Gebirge von der Unterseite der Kruste in die aktive Zone hinabdringt, ist durch die Bedingung annähernd isostatischen Gleichgewichtes gegeben<sup>1</sup>, also ein wenig geringer als die Erhebung des sichtbaren Gebirges.

<sup>1</sup> Es ist manchmal die gegenteilige Ansicht ausgesprochen worden, daß das Faltengebirge submarin gebildet und dann erst als Ganzes gehoben werde (Bertrand, Tornquist u. a.). Die

Es bildet sich so eine Art Stiel oder Wurzel, die in den Mittelraum des Wirbels, die Verschluckungszone hinabgezogen wird. Wenn nun, wie es meistens der Fall zu sein scheint, nicht die ganze Breite der Geosynklinale mit einem Male fertig gefaltet wird, sondern mehrere Faltungsphasen aufeinanderfolgen, bildet diese tief in die aktive Zone hinabreichende Wurzel eine Art Leitschiene, an welche die Zyklone des zweiten Faltungsaktes sich anlehnt, oder längs welcher sie wandert. Derart wird meist an die ältere im ersten Akt aufgefaltete Kette die jüngere genau anliegend förmlich angeschweißt. Ausnahmen kommen natürlich vor, hauptsächlich dahin gehend, daß die Zyklone nach der freien Außenseite abirrt (Virgation). Dafür, daß die Zyklone trotz des Hindernisses durch den Wurzelstiel die Bahn der vorangegangenen überkreuzt, weiß ich kein Beispiel. Sicherlich wird das, wenn überhaupt, doch äußerst selten vorkommen. Man muß hier eine Verwechslung von Strömungen des Untergrundes mit Bewegungslinien der Krustenschollen vermeiden. Für die neue Faltung spielt das bereits aufgefaltete Gebirge gewissermaßen die Rolle der Füllfläche und es wird eventuell im Anschluß an dieselbe etwas verstellt werden (besonders an den Bogenwendungen wird es kaum ohnedem abgehen können) u. z. nach Bewegungsflächen des neuen Systems, die natürlich die alten überkreuzen können. Das bedeutet an sich aber noch nicht, daß die neue Zyklone die alte überkreuzt hat. Ferner bezieht sich diese Bemerkung nur auf Akte derselben einheitlichen orogenetischen Periode, die aus derselben Geosynklinalsituation hervorgehen. Einen gewissen Einfluß wird ein altes Gebirge (Karbon) auf die junge Faltung (Tertiär) jedenfalls auch haben, allein dieser ist gewiß nicht so eng und besonders nicht unmittelbar.

Auch im absteigenden Konvektionsstrom treten Verschiebungen der thermochemischen Gleichgewichte und sonach Differentiationen auf; es wäre daher auch hier eine der Bedingungen für vulkanische Vorgänge gegeben. Allein man wird vermuten dürfen, daß die nach der Richtung der Volumsverringerung laufenden Prozesse nur ausnahmsweise besonders steigkräftige Bestandteile aussondern. Aber gerade hier wäre dies notwendig, da sie gegen die Strömung aufzusteigen und eine dickere Kruste zu durchdringen hätten. Die Prozesse, welche beim Absinken zur Sonderung geführt haben, laufen beim Wiederaufsteigen umgekehrt, was den Auftrieb, wenn auch wegen eingetretener Saigerung die Differentiation nicht ganz rückgängig gemacht werden kann, jedenfalls stark vermindern wird. Die Beobachtungen scheinen auch mehr dafür zu sprechen, daß die Vulkane in Faltengebirgen die Faltung bereits vollendet angetroffen

Beobachtung zeigt dagegen meistens gewaltige Conglomeratbildungen als Spur einer Hebung gleich mit dem ersten Faltungsakt. Der Hauptgrund dieser Theorie war wohl

weniger die Beobachtung als der Zweck, nämlich einige Bedenken gegen den Nappismus zu beschwichtigen.

haben, also eine Art posthumer Vulkanismus vorstellen. Dann werden allerdings die abgespaltenen Magmabestandteile nicht mehr gegen den Strom sich emporkämpfen müssen. Da sie aber einen weiten Weg zurückzulegen haben, erscheinen sie erst ziemlich lange nach Abschluß der Faltung. Daß eine neue aktive Antizyklone in ein eben aufgefaltetes Krustenstück eindringt, scheint wenig wahrscheinlich; denn das würde erfordern, daß der Konvektionsstrom gegen den lokalen Druckgradienten in Gang gebracht werde und das in einem Gebiete, das nach der völligen Umwälzung kaum mehr instabil sein kann, also gar keine Vorbedingungen dafür bietet. Eher noch ist ein Uebergreifen der Zyklone in junges Vulkangebiet denkbar, da ein solches sich anscheinend schneller isostatisch ausgleicht, als das Faltengebirge. Doch wird man sich auch hier vor der Verwechslung von Strömung der Tiefe und Tektonik der Oberfläche in Acht nehmen müssen. Die Zone der Faltung ist viel breiter als die eigentliche Zyklone (= Verschluckungszone) und wenn die Faltung junge vulkanische Produkte ergreift, bedeutet das noch nicht ein Eindringen der Zyklone in das junge Antizyklonalgebiet. Es hat somit gute Gründe, daß Vulkane in jungen Faltengebirgen selten vorkommen. Aber, wenn unsere Anschauung richtig ist, müssen Zwischenformen zwischen völligem Durchdringen bis zur Oberfläche und Steckenbleiben in ganz unerforschlichen Tiefen vorhanden sein. Die Alpen z. B. haben keine jungen Vulkane; aber in jenen Gebieten, welche etwa ihrer Zyklone entsprechen, sind — zeitlich ungefähr im Gefolge der Faltung — die Gesteine ziemlich weitgehend umgewandelt worden. Die Tiefe, in welcher diese Gesteine (wegen Sedimentbedeckung oder Ueberfaltung) sich höchstens befunden haben können, würde unter normalen geothermischen Verhältnissen nicht jene Temperatur bedingt haben, welche für die beobachteten Mineralneubildungen nötig war. Gegenprobe: das Algonkium des Colorado-Kanon war noch stärker überdeckt, als wir hier im äußersten Fall rechnen dürfen, und ist nicht metamorph. Die Kontaktwirkung der aufgeschlossenen Granitintrusionen und mechanischer Druck vermögen lokale Erscheinungen zu erklären, nicht aber eine über weite Gebiete gleichmäßig wirkende Metamorphose. Insbesondere aber hat der Vorgang unter Zufuhr von Stoffen stattgefunden, welche wie Wasser und Kohlensäure häufig, wie Chlor und Bor (Verbreitung des Turmalin!) fast ausschließlich aus vulkanischen Exhalationen stammen<sup>1</sup>. Beides, abnormale Temperaturerhöhung und Exhalation, deutet auf gewaltige vulkanische Vorgänge in der Tiefe, und die Erklärung, daß der Vulkanismus in der Zyklone eine ebenso regelmäßige, naturnotwendige Erscheinung ist, wie in der Antizyklone, aber hier viel seltener als in der Antizyklone bis zur Oberfläche durchzudringen vermag, wird durch dieses Beispiel über den Rang einer bloßen Verlegenheitsausrede hinausgehoben.

<sup>1</sup> Vgl. Koenigsberger J., Geologische Beobachtungen am Pizzo Forno (Schweiz, Kanton Tessin) und Beschreibung der Minerallagerstätten des Tessinermassivs. Neues Jahrb. f. Min. Geol. Pal. Beil. Bd. 26, 1918. S. 543—544.

## IX. DIE FÜLLFLÄCHEN.

Die Zyklonen und Antizyklonen, die Gebiete, in denen der auf- oder absteigende Konvektionsstrom das Bewegungsbild beherrscht, nehmen nur ziemlich schmale Streifen der Erdoberfläche in Anspruch. Die Flächen, welche die Zwischenräume zwischen diesen Streifen füllen, die „Füllflächen“ werden entweder von den horizontalen Verbindungsgliedern des Strömungssystems beherrscht oder bleiben überhaupt in Ruhe. Stellenweise müssen korrespondierend mit den Horizontalströmungen der aktiven Zone beträchtliche Horizontalverschiebungen und daher auch Deformationen großer Krustenstücke vorkommen, z. T. einfach als Folge der Verschiebung auf dem Sphäroid, hauptsächlich aber deswegen, weil die Grundströmungen nicht gleichmäßig und parallel verlaufen. Wo die Stromlinien divergieren, tritt Zerrung, wo sie konvergieren, Stauung, wo Geschwindigkeit, bezw. Ausmaß der Horizontalbewegung variiert, Blattverschiebung ein. Jede stärker bewegte Krustenpartie wird durch ein einheitlich entstandenes Dislokationssystem mit wesentlich horizontalem Bewegungssinn gegliedert. Im Gefolge werden wahrscheinlich auch Hebung und Senkung auftreten: infolge von Kippbewegungen von Krustenblöcken oder wegen Aenderungen in der tragenden Säule, allein hier sind sie nur Begleiterscheinungen, nicht der wesentliche Inhalt, wie bei den nachher zu ihrer Ausgleichung einsetzenden epirogenetischen Bewegungen.

Wir bezeichnen diese Dislokationssysteme der Füllflächen als sekundäre oder zugeordnete orogenetische Vorgänge. Sie hängen in der Hauptsache von der Lage des betreffenden Krustenstückes zu den Kraftzentren, den Zyklonen und Antizyklonen ab. Die vorherrschende Form der Hauptdislokationsflächen steht an der Erdoberfläche ziemlich steil, nach der Tiefe zu müssen dieselben um- und nach rückwärts (im Sinne der Bewegung gerechnet) einbiegen in horizontale Bewegungsflächen u. z. dies spätestens an der Grenze von Kruste und aktiver Zone. Diese Ueberschiebungen ersterben dann dort, wo die relative Verschiebung gegen die Unterlage durch die Deformation ausgeglichen ist, kleinere Verwerfungen können wohl auch ähnlich in der Kruste selbst auslaufen, oder sie vereinigen sich in der Tiefe mit den Hauptbewegungsflächen. Wenn auch die äußere Form sehr ähnlich der eines durch epirogenetische Hebung oder Senkung entstandenen Schollengebirges ist, so überwiegt doch bei diesen zugeordneten orogenetischen Bruchsystemen die Horizontalkomponente der Bewegung<sup>1</sup>.

Wo die Kruste einer gleichmäßigen Strömung aufliegt, fehlt der Anlaß zu Dislokationen. Beispiele dieser Art haben zu der weitverbreiteten Ansicht geführt, daß derartige dünne, von tausenderlei Klüften, Lassen und Spalten zerstückelte Riesentafeln

<sup>1</sup> Ein schönes Beispiel dieser Art bietet das Rheintalgrabensystem, das durch die Untersuchungen Salomons und seiner Schüler auf-

gehellt worden ist. Dieses Dislokationssystem ist der Alpenfaltung zuzuordnen.

„starre Schilde“ vorstellen und ihre Festigkeit ein Hauptelement im tektonischen Geschehen wäre. Das lag, wie schon erwähnt, in der Linie der vorgefaßten Ansichten der Kontraktionstheorie. Man hat einfach geschlossen: der Schild reicht bis an die Faltenzone, also hat sich diese an seinem starren Rand gestaut. Schließlich muß zwischen Bruch- und Faltengebiet irgendwo eine Grenze sein. Nennt man das erstere „Schild“, „Masse“ usw., so ist es weiter nicht verwunderlich, wenn man dies nachher in der Form wiederfindet, daß die Faltung nur bis an den Rand der Masse gelangen konnte. Daß diese Grenze häufig sehr scharf markiert ist, bedeutet allerdings eine beachtungswerte weitere Beobachtung, erfordert aber keineswegs Festigkeitsunterschiede zur Erklärung, man erinnere sich nur, wie scharf oft Meeresströmungen sich gegen die Umgebung abgrenzen.

Ein hübsches Beispiel ist die Böhmisches Masse. Auch diese hat ihr zugeordnetes Bruchsystem, vielleicht nicht so bedeutend wie Schwarzwald-Vogesen, aber gar nicht unbeträchtlich und auch mehrfach besprochen. Daß dies ihrer Festigkeit ein schlechtes Zeugnis ausstellt, kam nicht zu Bewußtsein; ebensowenig, daß die direkte Fortsetzung der „Masse“ im obersteirischen Kristallin wieder auftaucht<sup>1</sup>, und das, obwohl an einer Verbindung bei der durch gleichartige Gesteinskomplexe eigentlich niemand zweifelt<sup>2</sup>, im Gegenteil für das Fortbestehen eines Zusammenhanges im tieferen Untergrund gewichtige Anhaltspunkte vorliegen<sup>3</sup>. Der Graben, in dem die frühere Geosynklonale und jetzt die Faltenzüge der Kalkalpen gelegen sind, zieht somit durch eine ursprünglich einheitliche Tafel; Böhmisches Masse heißt, was nördlich des Grabens liegt, ihr Umriß wird durch diesen aktiven Streifen bestimmt — und folgt daher dessen Streichen — nicht aber umgekehrt die Faltung durch Festigkeitsunterschiede. Im allgemeinen kann man sagen, daß Festigkeitsunterschiede nur für die Detailtektonik von Bedeutung sind. Für die großen orogenetischen Bewegungen bedeutet die Erdkruste wenig mehr als die Haut, welche den arbeitenden Muskel überdeckt.

<sup>1</sup> Vgl. Schwinner, Analogie im Bau der Ostalpen. Centralbl. f. Mineralogie etc. 1915, S. 55 und 59. Der Gedanke an diesen Zusammenhang hat sich schon den ersten Aufnahmegeologen aufgedrängt, wurde aber leider nicht aufgenommen und weiter entwickelt, so daß er heute aus der Verschüttung durch Nappismus und ähnlichen Schutt von zweifelhaften Theorien erst wieder ausgegraben werden muß.

<sup>2</sup> Wenn es sich um exotische Blöcke, Schüblinge und ähnliches aus dem Kalkalpenuntergrund handelt, wird stets mit schöner Selbstverständlichkeit angenommen, daß dies Gesteine der böhmischen Masse sind.

<sup>3</sup> Die seismischen Beobachtungen zeigen, daß inneralpine (obersteirische u. a.) Beben nicht in der Hauptstrichrichtung der Alpen, sondern meridional sich ausbreiten (also im Streichen der Sudetischen Falten) und daß sie unter den Kalkalpen durch, oft ohne diese in Mitleidenschaft zu ziehen, sich ins Alpenvorland und sogar tief in die Böhmisches Masse fortsetzen. Es müssen sehr tief liegende Strukturelemente noch heute eine Verbindung zwischen beiden Gebieten herstellen. Vgl. Heritsch. Fr. „Das Judenburger Erdbeben vom 1. Mai 1916“ Mitt. d. Erdbeben-Kommission der Akad. d. W. Wien. Neue Folge No. 49. Wien 1916, S. 16 ff.

## X. ABHÄNGIGKEIT DES STRÖMUNGSSYSTEMS VON DEN BEDINGUNGEN DER OBERFLÄCHE.

Daß die orogenetischen Vorgänge in ihrer räumlichen Verteilung von den Großformen der Erdoberfläche abhängen, ist ungemein augenfällig; Faltengebirge und Vulkanreihen folgen den Umrißformen der Kontinente, wenn sie auch nicht gerade ausschließlich und genau an die Küstenlinien gebunden sind.

Als Einfluß, welcher den Ablauf des thermo-dynamischen Prozesses von der Oberfläche her beeinflusst, bietet sich der Umstand, daß die Wärmeabgabe an der Erdoberfläche in weiten Grenzen variiert. Wählen wir eine Isothermenfläche etwa zwischen  $10^{\circ}$  und  $20^{\circ}$  C., um nicht allzuweit von der Oberfläche abzukommen, so sehen wir, daß sie im Untergrund der Kontinente, besonders der hohen Tafelländer, ziemlich hoch emporsteigen kann, dagegen, durch die Meere, besonders die großen Ozeane mit ihrem kalten Bodenwasser noch viel mehr hinabgedrückt wird. Wenn die der Oberfläche nahen Isothermen deren Unebenheiten auch nicht ganz genau verfolgen, so ist ihr Gesamterief mindestens ebenso stark bewegt und uneben. Die gegen die Tiefe zu folgenden Isothermen müssen diesen Wellen in gewissem Grade folgen, schwächen sie aber je tiefer desto mehr ab, sie nähern sich immer mehr den Niveauflächen der Schwere, des Druckes usw. In einem Streifen gewisser Breite beiderseits der Küstenlinien werden somit die Isothermenflächen (und weiter die Flächen gleichen Druckes, gleicher Dichte) bis zu einer gewissen Tiefe hinab die Niveauflächen der Schwere überkreuzen. Bekanntermaßen kann unter solchen Bedingungen hydrostatisches Gleichgewicht nicht bestehen. Reicht diese Störung bis unter die einer Strömung unfähige passive Kruste, in die bewegliche aktive Zone hinein, so wird dies einen fortwährenden Energieaustausch durch Strömung (kurze Zykel) veranlassen. Dies wird am ehesten dort zutreffen, erstens wo die Störung tief hinabgreift, zweitens wo bewegliches aktives Material in höherem Niveau auftritt. Die Tiefenwirkung der Störung ist offenbar dem Ausmaß an der Oberfläche proportional, also desto größer, je höher und steiler der Kontinent aufsteigt und je schneller der Meeresboden zu abyssischen Tiefen abfällt. Und wenn wir die aktive Zone mit dem Sima, dem schwereren, leichter schmelzbaren, weniger viskosen Material identifizieren dürfen, so liegt ihre obere Grenze unter See höher als unter Land. Besonders hohe Beweglichkeit werden wir ferner im Untergrund vulkanischer Gegenden erwarten dürfen.

Alle diese Bedingungen treffen bei jenem Küstentypus zusammen, den man den „pazifischen“ nennt: Kontinentalrand ein junges Faltengebirge, Meeresboden schnell zur „Vortiefe“ absinkend, stets von Vulkanreihen (am Kontinent oder auf Inselketten) begleitet. Eine solche Küste pazifischen Typs ist offensichtlich ein ganz junges Gebilde, geschaffen durch die Umwälzungen der letztvergangenen orogene-

tischen Periode. Die Antyzyklonen dieser haben große Magmabassins in die Kruste emporgetragen (in geringerem Maße auch die Zyklonen). Unter den beschriebenen thermischen Verhältnissen können diese nicht zur Ruhe kommen, dauernde Ausgleichströmungen mischen sie durch, und was in ihrem Chemismus an eruptiver Möglichkeit gegeben war, wird derart reiflos sozusagen ausgequetscht. Daher wird hier der posthume Vulkanismus am längsten die orogenetische Periode überdauern, unter günstigen Umständen sich auch spontaner Vulkanismus als lokaler kurzer Zykel entwickeln können. Der Kontinentalrand als junges Faltengebirge stellt eine Verdickung der passiven Kruste dar und wird daher von der thermischen Störung am wenigsten in Mitleidenschaft gezogen werden können. Anders die Vortiefe (Geosynklinale). An und für sich ist der unterseeische Abfall der Kontinentalsockel ein Vielfaches der über das Meer aufragenden Böschung. Schon deswegen fällt der weitaus größere Teil des thermisch gestörten Gebietes der Vortiefe zu. Bedenkt man nun, daß dies mit hoher Lage der aktiven Zone zusammentrifft, so ist

es leicht erklärlich, daß der größte Teil der Erdbeben von diesen Vortiefen seinen Ausgang nimmt.

Um einem naheliegenden Einwand zu begegnen: Strömungen in einer idealen Flüssigkeit, auch mit großer innerer Reibung könnten zu Erdbeben nicht Anlaß geben. Allein hier handelt es sich um Verschiebungen an der oberen Grenze der aktiven Zone gegen die passive Kruste, die man sich nicht nach dem Modell Wasser-Eisdecke vorstellen darf, sondern

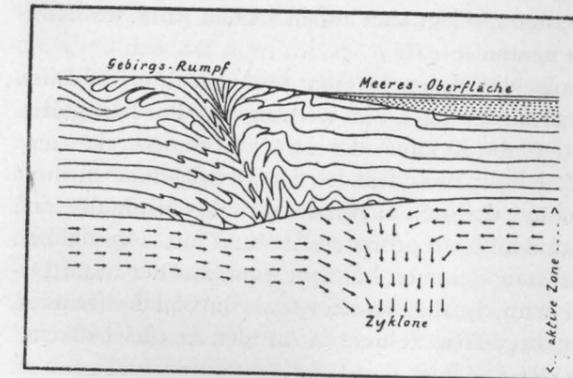


Fig. 2.

als allmählichen Übergang mit unregelmäßigem Wechsel mehr oder minder zähflüssigen bis festen Materiales. Was unten ruhiges Fließen ist, wird oben zum ruckweisen Verschieben der Schollen vertikal, horizontal, bis zur Oberfläche durchdringend oder in der Kruste ersterbend, Diese Rucke und Stöße sind die Erdbebenimpulse und die Herdtiefe kennzeichnet jenen Wechsel der physikalischen Eigenschaften, durch den wir die aktive und passive Zone der Tektonosphäre unterschieden haben.

Abgesehen von diesen nach Bedingungen und Wirkungen lokalen Vorgängen, welche das Gebiet der Vortiefe in beständiger Unruhe erhalten, können wir den Ablauf der

großen orogenetischen Bewegungen uns etwa folgendermaßen vorstellen: (Man vergleiche hierzu die umstehende schematische Zeichnung. Es wurde getrachtet, sie nicht allzu unnatürlich ausfallen zu lassen, doch kann für die Maße und Strukturlinien im einzelnen keine Haftung übernommen werden.)

Wir gehen von einer einfachen Küste pazifischen Typs aus. Der Kontinentalrand trägt ein Faltengebirge der letztvergangenen Gebirgsbildungsperiode. Ist unterm Kontinent die passive Kruste überhaupt dicker als unterm Ozean, so ist diesem Rande die Verschlückungszone des Faltengebirges noch dazu als Ranft aufgesetzt, die Kruste reicht hier besonders tief hinab. In der Vortiefe sei nun ein absteigender Konvektionsstrom in Gang gebracht worden (aus welchen Ursachen soll später erörtert werden), dann muß der vom Ozean her der Zyklone zufließende Horizontalstrom in wesentlich höherem Niveau liegen als der von der Landseite, der unter diesem Ranft wie in einem Dücker durchtaucht. Das Ergebnis dieses Kräftepaars (Drehmomentes) ist, daß der Zusammenschub der Geosynklinale derart erfolgt, daß die obern Krustenpartien vom Meer zum Land in Falten übereinandergeschoben, die tiefern Krustenpartien vom Land zum Meer unter sie untergeschoben werden. So legt sich außen an den Rand des Kontinentes, an das alte Faltengebirge ein neues.

In dem meerwärts an die Zyklone anschließenden Streifen kommen in erster Linie die dem Wirbel zustrebenden Horizontalströmungen zur Geltung. In den hangenden Schichten der aktiven Zone repräsentiert die Zyklone das Druckminimum, sie saugt von der Seite her an. In der ersten Zeit ihrer Aktivität ist das Druckgefälle in ihrer Nachbarschaft groß, das Erlöschen kommt dadurch zustande, daß das Minimum sich verflacht, d. h. daß die gleiche Druckabnahme auf größeren Abstand hinausgeschoben wird. Das wird offenbar nur derart zustande kommen können, wenn aus der unmittelbaren Nachbarschaft mehr in den Wirbel hinein abgeflossen ist, als ihr von der ferneren Nachbarschaft zugeflossen ist. In den liegenden Schichten (an der Ausgleichsfläche) kehrt sich das Verhältnis um. Die Zyklone ist hier das Druckmaximum und gibt an die Nachbarschaft ab und zwar mehr, als von dieser weiterfließt. Die Bilanz unserer Nachbarsäule weist nun auf: oben Verlust an spezifisch leichterem, stärker gekühltem Material, unten Zuwachs an schwererem, jedoch weil aus der Zyklone stammenden, kühlerem. Unzweifelhaft wird dadurch das Gewicht dieser Säule wachsen, das Gesamtvolumen jedoch abnehmen, so daß an der Oberfläche eine Senkung resultiert. Die instabile thermische Schichtung in ihr wird dadurch beseitigt, daß die Strömung sie unten kühlt, oben aber wärmt, (das abgesaugte Oberflächenmaterial wird nur zum Teil durch wieder solches aus der Nachbarschaft, zum andern aber durch Aufsteigen der nächsttiefern Schicht und Zufluß aus Antizyklonen gedeckt, beides wärmer als

der Oberflächendurchschnitt). Dem, daß der Nachbarstreifen der Zyklone nun oben wärmer ist als die weiter entfernten Teile des Meeresbodens, entspricht größerer Wärmeverlust, stärkere Kontraktion und somit weitere relative Absenkung. Während die ursprüngliche Geosynklinale aufgefaltet wird, bildet sich weiter meerwärts anschließend zur gleichen Zeit eine neue Vortiefe.

Bisher haben wir von dem Einfluß der vulkanischen Antizyklonen abgesehen. Diese bilden zwar keinen vollständig zusammenhängenden Streifen wie die Zyklone; wie die Erfahrung zeigt (und weiter unten auch aus der Theorie begründet werden soll) halten aber auch sie sich an die nähere oder fernere Nachbarschaft der Geosynklynalzone. Das Material, das aus den Antizyklonen in den fraglichen Nachbarstreifen strömt, ist heißer als der Oberflächendurchschnitt, das folgt aus dem Wesen des aufsteigenden Konvektionsstromes; es ist aber auch überdurchschnittlich schwer, denn der leichtere Teil hat sich abgespalten und ist weitersteigend in und durch die Kruste gedrungen. Auch die Antizyklone wirkt dahin, den an die Zyklone anschließenden Streifen schwerer und heißer zu machen.

Eine gewisse Stütze findet diese Anschauungsweise zweifellos in der Tatsache, daß die Produkte des ozeanischen Vulkanismus sehr basisch und sehr heiß sind (Hawaii u. and.). Man hat auch Gründe, zu vermuten, daß dies für die Geosynklinale der geologischen Vergangenheit zutrifft (Steinmanns Verbindung von Tiefseeabsätzen und Ophiolithen). Hier müssen wir auch begründen, warum wir den andern Nachbarstreifen der Zyklonenzone, den landwärts gelegenen in den Hintergrund stellen dürfen. In gewissem Grade treffen die vorstehenden Schlußfolgerungen auch auf ihn zu, auch er wird schwerer und heißer werden und eine anfängliche Absenkung erfahren. Allein hier unter dem Kontinentalrand ist die Kruste außergewöhnlich dick, die betreffenden Vorgänge spielen also in einer bedeutend größeren Tiefe. Die Intensität der Wirbelbewegung nimmt aber nach unten zu ab (muß sie doch das Zeichen wechseln) und damit verringert sich auch die Wirkung. Und daß die weitere thermische Entwicklung nicht den Weg der neuen Vortiefe geht, ist der Schutz durch die dicke, schlecht leitende Kontinentalplatte schuld. Der von der in Faltung begriffenen Zone landeinwärts gelegene Streifen, das „Vorland“, wird zwar auch eine Absenkung erfahren, aber nicht so tief, wie der meerwärts gelegene, insbesondere wird aber er die Senkung nicht weiter fortsetzen, er wird in Ruhe verlanden, nicht aber in einem Geosynklynaltrug sich umformen. Als Beispiel hierfür kann das Flysch-Molasse-Becken im Vorland der Alpen gelten. Im Rücken des Faltengebirges folgt dagegen meistens andauerndes Sinken (bei den Alpen: Einbruch der Adria), hier formt sich die neue Geosynklinale. Ausnahmen sind gewiß denkbar, sind doch die Verhältnisse der wirklichen Geosynklinale keineswegs so einfach wie in dem hier angenommenen Musterbeispiel; man wird aber nicht

bestreiten können, daß die hier skizzierte Entwicklung in den meisten Fällen gut zutrifft und eine ganz brauchbare Erfahrungsregel vorstellt. Man könnte schließlich noch einwenden, daß die hier gemachten Annahmen über einen Wechsel im Gewicht der über der Ausgleichsfläche stehenden Säulen einen Widerspruch mit der Grundannahme des isostatischen Gleichgewichts bedeute. Allein dies hieße verkennen, daß der Strömungszustand, ob nun viel oder wenig, jedenfalls grundsätzlich vom Zustand der Ruhe abweichen muß. Einfache Ausgleichsströmungen allerdings könnten die bestehenden Gleichgewichtsstörungen nur verringern, die von thermischer Energie getriebenen orogenetischen Strömungen können sie sehr wohl da oder dort vergrößern oder auch neue schaffen.

Wir haben nun geschildert, wie in dem an die Faltungszone meerwärts anschließenden Streifen sich eine neue Vortiefe bildet. Sie hat Überschwere<sup>1</sup> und ausnahmsweise großen Wärmeverlust, daher Tendenz zum Sinken, weitere Folgerung: daß sie nämlich auch die Tendenz zum instabil werden hat, und zwar wegen des größeren Wärmeverlustes schneller und tiefgreifender als die Nachbarschaft gegen Meer und gegen Land zu. All dies sind Momente, welche die Entstehung eines absteigenden Konvektionsstromes an dieser Stelle begünstigen. Allein ich glaube, daß sie alle zusammen noch nicht genügen würden, den Umsturz der nach und nach labil gewordenen Schichtung der aktiven Zone gegen alle Widerstände herbeizuführen, wenn nicht ein weiteres hinzukäme: In dem küstennahen Trog der Vortiefe sammelt sich das gesamte vom Festland, insbesondere vom jungen Randgebiete erodierte und abgeschwemmte Material und bildet die charakteristischen ungemein mächtigen Geosynklinalsedimentserien deren besondere Eigentümlichkeit die Mächtigkeit von Sedimenten aus stets seichtem Wasser ist; der eigentliche Meeresboden hält im Absinken gleichen Schritt mit der Aufschüttung, z. T. vielleicht, weil er unter deren Last isostatisch nachgibt, z. T. aber auch jedenfalls wegen der vorstehend skizzierten der Geosynklinale eigentümlichen Tendenz zum Sinken. Auch diese Belastung ist noch gering im Vergleich zu den Massen, welche in Bewegung gesetzt werden müssen. Denn eine Strömung kann nur in Gang kommen, wenn der ganze Kreislauf, der mindestens 120 km tief hinabgreift, mitgerissen worden ist und demgegenüber wiegt ein Sedimentpaket von höchstens einigen tausenden von Metern nicht viel. Nur weil jene ungeheure Masse selbst nur im instabilen Gleichgewicht ist, kann dieses kleine von außen zugefügte Übergewicht genügen, die orogenetischen Bewegungen auszulösen und in Gang zu bringen.

Es darf nicht übersehen werden, daß die Anhäufung von Geosynklinalsedimenten

<sup>1</sup> Eine Übersicht des Materials ist bei Sueß (Antlitz der Erde Bd. II/2 1909, S. 711) zu finden. Wenn man will, kann man die Über-

schwere der Geosynklinalen daraus herauslesen. Doch möchte ich darauf vorläufig noch keinen Nachdruck legen.

auf der andern Seite die thermische Entwicklung in der Geosynklinale hemmt, oder verzögert. Denn die Sedimentbedeckung verzögert die Abkühlung und die der zunehmenden Belastung entsprechende Kompressionswärme kommt wohl zum größten Teil den oberen, kompressibleren Schichten zugute, wirkt also dem Instabilwerden entgegen. Bis zu gänzlicher Aufhebung oder Umkehrung der Entwicklungstendenz wird dieser Einfluß meistens nicht hinreichen. (Gelegentlich wird ja eine unbedeutendere Geosynklinale durch Verlandung ersterben können, doch dürfte dieser Fall eine Ausnahme bilden). Unter anderm muß man auch bedenken, daß Senkung und Erosion die Küstenlinie zurückzuschieben streben, also die Sedimentzufuhr, für die erst betroffenen Teile wenigstens, selbsttätig abnimmt. Betrachten wir das Beispiel der alpinen Geosynklinale: im Jura rückt die Schelfsee weit nach Mitteleuropa zurück, der Absatz im Haupttrog wird auf ganz geringfügige Mächtigkeit reduziert, sein Boden sinkt bis ins Abyssische, und Ende der Jurazeit setzt auch schon die erste Phase der orogenetischen Umwälzung ein. Das zeigt, daß das Sinken der Geosynklinale gewiß nicht ausschließlich ein isostatisches Nachgeben unter der Sedimentlast ist, sondern auch eigene Tendenz, wegen Überschwere und thermischer Kontraktion. Eben deswegen, weil der Trog sinkt, kann er so viel Sediment sammeln, dessen Gewicht dann allerdings zur Senkung auch noch ein übriges tut. Vielleicht ist aber eine Phase, wie der alpine Jura, wo die Senkung autonom vorherrscht, für die Entwicklung oder Erhaltung der Geosynklinaleaktivität sogar erforderlich und leitet seinerseits zum absteigenden Konvektionsstrom über. Dagegen dürfte die manchmal hervorgehobene Emersion vor Beginn der Faltung nicht mehr zu den eigentlichen Geosynkinalbewegungen gehören, sondern der Ausdruck dafür sein, daß die Stauung in den tiefen Krustenschichten, die Verdickung der Kruste bereits begonnen hat: also Teil des orogenetischen nicht des epirogenetischen Vorganges.

Wir sind von einer Küste ausgegangen, welche ein Faltengebirge der letzten orogenetischen Periode trägt und welcher eine Vortiefe vorgelagert ist und haben dann angenommen, daß in dieser Vortiefe (Geosynklinale) ein absteigender Konvektionsstrom (Zyklone) entstehe — vorläufig ohne Begründung, warum gerade dieser Raum für die neue Zyklone prädestiniert ist. Daraus wären die folgenden orogenetischen Ereignisse abzuleiten: die Geosynklinale wird zusammengestaut und legt sich als junges Faltengebirge an den Rand des Kontinentes, dessen Küste durch diesen Zuwachs meerwärts rückt. Außerhalb an die frühere Geosynklinale und jetzige Faltungszone anschließend, bildet sich eine Senkung, eine neue Vortiefe. Wir haben nun nachgewiesen, daß diese nach ihren thermischen und andern Vorbedingungen eine Tendenz zu weiterer Absenkung und zum Instabil werden hat, als Randmeer empfängt es auch in der Last des Sediments jenes Übergewicht, welches nötig ist, das orogenetische

Strömungssystem in Gang zu bringen: eine derart entstandene Vortiefe muß sich naturnotwendig zur Geosynklinale und zur Zyklone der nächsten orogenetischen Umwälzung entwickeln. Damit ist der Kreis unseres Beweises geschlossen. Die Endlage, welche die orogenetische Revolution geschaffen hat, ist in den mechanischen und thermischen Voraussetzungen die gleiche, wie die Anfangslage, von der die Entwicklung ihren Ausgang genommen hat. Das gleiche Spiel kann wieder beginnen: mit andern Worten: der pazifische Küstentypus regeneriert sich selbst, er stellt jene Seite des Kontinentes dar, welche periodisch durch Angliederung stets neuer Faltenzonen wächst und sich gegen den Ozean zu vorschiebt. Jede orogenetische Umwälzung schafft bereits die Vorbedingungen für die nächste, sich hier anzuschließen.

Damit scheint Grund und Art der Abhängigkeit der Faltung von den Formen der Kontinente und Ozeane wohl genügend begründet. Warum auch der Vulkanismus sich eng an dieselben Leitlinien anschließt, ist noch zu erklären. Im Vorstehenden hatten wir nur einen Grund gefunden, daß er an den pazifischen Küsten, wenn einmal dort bedingt, und in Tätigkeit, sich restloser und länger dauernd auswirkt als anderswo. Die dort ebenfalls gegebene Möglichkeit eines lokalen Vulkanismus dürfen wir wohl nicht allzu hoch einschätzen, ein sicheres Beispiel wüßte ich wenigstens nicht anzuführen. Versuchen wir uns das Bild des orogenetischen Strömungssystems vorzustellen, so sehen wir einmal in großen Kreisen längs den Ozeanrändern die Zyklone angeordnet. Die einfachste Ergänzung schiene eine Hauptantizyklone inmitten jeden solchen Zyklonenbogens zu sein, von welcher eine Horizontalströmung nach allen Seiten hin ausgeht. Wir treffen nun ja an solchen zentralen Punkten Vulkangruppen, aber kaum so gewaltig, wie sie im gedachten Falle auftreten müßten; die Hauptmasse der Vulkane schließt sich eng an den Zyklonengürtel an.

Prüfen wir aber nunmehr die Art, wie das Strömungssystem sich entwickelt: den ersten Impuls gibt das Absinken der Geosynklinale, das einen absteigenden Konvektionsstrom, eine Zyklone, auslöst. Von dieser pflanzt sich der Anstoß in Horizontalströmungen weiter fort und diese erst wieder verursachen anderswo aufsteigende Strömungen, die bei instabiler Schichtung sich in Konvektionsströmungen umwandeln, wodurch der Kreislauf geschlossen wird. Die Wege, welche die Horizontalströmungen einschlagen werden, sind bestimmt durch die angetroffene Druckverteilung. Nur wo der Druckgradient ursprünglich groß ist, wird sich eine mächtige horizontale Strömung entwickeln, auf den großen kontrastlosen Flächen geht sie ins Breite und verflacht. Der Impuls zum Aufsteigen in irgend einer vertikalen Säule kommt dadurch zustande, daß im oberen Teile Material zur Zyklone hin abgesaugt, im untern Teile aber von derselben her zugeschoben wird, seine Stärke ist offensichtlich proportional den be-

treffenden horizontalen Strömungen. Nur wo Instabilität und ursprüngliche starke Gradienten zugleich angetroffen werden, ist es wahrscheinlich, daß der Anstoß genügt, die Widerstände zu überwinden und einen aufsteigenden Konvektionsstrom in Gang zu bringen. Diese Bedingungen sind nun sicher in der Nähe der thermisch gestörten Geosynklinalküstenzone vielfach erfüllt, nicht aber auf den weiten thermisch wenig variierenden Flächen der Ozeane und Kontinente. Ist die Strömung aber einmal im Geleise, so mag sie sich verstärken, oder abschwächen, und die Strombahnen so oder so ein wenig verschieben, schwerlich wird sie ihren Zusammenhang wesentlich verändern; die erste Anlage entscheidet hier.

Da die einleitenden Strömungen der angetroffenen Druckverteilung folgen, müssen dort, wo aus irgend einem Grunde an der oberen Fläche ein, wenn auch vielleicht nur kleines, Druckmaximum, an der untern ein Druckminimum besteht, ihre Stromfäden konvergieren. An diesen Stellen ist der Impuls am stärksten und die Entstehung von Antizyklonen am wahrscheinlichsten. Diese Entstehungsart bringt es mit sich, daß der Vulkanismus diesen Anfangszentren entsprechend in getrennten Vulkangruppen und -Gebieten auftritt, im Gegensatz zur geschlossenen Zone der Faltung, welche ganz in anderer Weise durch ein flächenhaft gleichmäßig auflastendes Gewicht in Bewegung gesetzt worden ist.

Die so nahe benachbarten Zyklonen und Antizyklonen werden wohl in der Hauptsache sich das Gleichgewicht halten, genau trifft dies aber nicht zu, ein gewisser Bruchteil der Horizontalströmung geht nicht direkt von Antizyklone zur Zyklone (oben, und umgekehrt unten), sondern verstreut sich über die ganze Kugelfläche. Da die Bewegung von der Zyklone aus eingeleitet wurde, und diese auch sonst Anzeichen größerer Aktivität zeigt, werden wir annehmen, daß das bezügliche Übergewicht auch auf ihrer Seite liegt. Diese schwachen Strömungen werden nun im allgemeinen nirgends eine besonders auffällige Wirkung haben. Nur im Zentrum eines von Zyklonen gebildeten Kreises, wo von allen Seiten Strömungsimpulse gleichen Sinnes eintreffen und sich addieren — werden wir mehr erwarten dürfen; es ist der gegebene Ort für eine Art Ergänzungsantizyklone. Das Bild, das sich aus all diesem ableitet, entspricht der Erfahrung: die Mehrzahl der Vulkane schließt sich eng an die Faltenzonen und Geosynklinalküsten an, während die Mitte eines solchen Falten- und Feuerkreises gelegentlich, aber nicht außergewöhnlich stark durch eine isolierte Vulkangruppe markiert wird. Als eine Art Gegenbeispiel können wir wohl den Mond ansehen: ihm fehlt das Wasser und damit der ordnende thermische Gegensatz. Daher sind seine Vulkane auch nicht wie auf der Erde zonen- und reihenweise angeordnet, sondern unregelmäßig über die ganze Fläche verstreut.

In gewissem Grade ist also das orogenetische Strömungssystem nur eine Fortsetzung

des die Ruhezeiten beherrschenden epirogenetischen Systems der Ausgleichsströmungen. Deswegen darf man aber den grundsätzlichen Unterschied beider nicht verwischen. „Voraussetzungslos“ kann eben keines von den beiden anfangen, ein allmählicher Übergang war a priori zu erwarten. Aber nur die Anfangsphase der orogenetischen Bewegung ist durch die angetroffenen (epirogenetischen) Gradienten bestimmt. Ist die Strömung voll in Gang gekommen, so folgt sie eigenen Gesetzen und wird sich demgemäß vielleicht nicht unbeträchtlich umwandeln. Vielleicht ist dies (neben dem Einfluß der Erdrotation) mit einer Ursache, daß die Zyklonen und Antizyklonen, deren Anfangslage durch das vorangegangene epirogenetische System bestimmt war, zu wandern beginnen, um die davon prinzipiell abweichenden Beharrungslagen des orogenetischen Systems zu suchen.

Im Vorstehenden ist auseinander gesetzt worden, wie die orogenetischen Umwälzungen in den Geosynklinalzonen verlaufen. Es liegt nun die Frage nahe, warum sie sich auch in der Hauptsache auf diese schmalen Streifen beschränken, warum dagegen die weit größeren Flächen der Kontinente und Ozeane einer relativen Ruhe und Stabilität sich erfreuen? Daß die Kontinente sich derart widerstandsfähig zeigen, liegt wohl daran, daß sie wegen des Schutzes, den ihre Gesteinsmassen der unterlagernden aktiven Zone gegen den Wärmeverlust bieten (durch geringe Wärmeleitfähigkeit und radioaktive Wärmeproduktion), tatsächlich sehr weitgehend vor dem thermischen Instabilwerden geschützt sind. Von den Ozeanen ist Ähnliches kaum anzunehmen (der höhere Gehalt der Tiefseesedimente an Radium ist in ähnlicher Hinsicht mit Unrecht herangezogen worden: mag der rote Tiefseeton einmal so viel davon enthalten wie die Kontinentalgesteine, so ist doch seine Mächtigkeit weniger als 1/10 000!). Wahrscheinlich ist es mit dieser Stabilität auch nicht so weit her. Nur: eine Umwälzung, die einen halben Kontinent zum Verschwinden brächte, schlägt in ihre ungeheuren Becken eine kaum merkbare Beule. Vulkanische Ereignisse gehen auf dem verdeckten Meeresraum vielfach vor sich, so daß man hier fast einen wesentlichen Unterschied gegenüber den Kontinenten annehmen möchte, welche außerhalb der orogenetisch bestimmten Zonen davon fast völlig frei sind. Der Hauptgrund des ruhigen Verhaltens der Ozeane dürfte darin liegen, daß auf ihren weiten Flächen die thermischen und mechanischen Bedingungen des Untergrundes fast gar nicht variieren. Ihr instabiles Gleichgewicht gleicht jenem Hause des Märchens, das so auffällig war, daß es gar nicht wußte, wohin es fallen sollte. Auch die Sedimentbelastung, welche die Geosynklinalen in Bewegung setzt, fehlt im offenen Ozean. Selbst bei großer thermischer Instabilität wird das Gebiet des offenen Ozeans mit dem Beginn der Bewegung gegen die Geosynklinalzonen ins Hintertreffen kommen. Ist aber in jenen die Bewegung einmal in Gang gekommen, so saniert sie sozusagen die instabilen Füllflächen, er-

wärmt den oberen Teil durch Absaugen des überkalteten in den Zyklonen und Nachschub aus den Antizyklonen, und kühlt das untere Ende durch den umgekehrten Strömungsvorgang. Und damit entfällt der weitere Anlaß zu Konvektionsströmungen. Wenn überhaupt solche hier zustande kommen, so scheinen es nur aufsteigende zu sein, (Vulkanismus); Faltung und Emersion dagegen scheinen nach der geologischen Erfahrung unzertrennbar.

Schließlich muß noch der Einwand besprochen werden, daß unsere Entwicklung zu genau, zu schematisch gelungen wäre, die beobachtbaren Naturereignisse aber viel mannigfaltiger wären. Das ist zum Teil gewiß richtig, ist aber im Grunde ein Mißverständnis. Es mußte vom einfachsten schematischen Falle ausgegangen werden, um die Überlegung überhaupt einmal durchführen zu können. Wenn die natürlich gegebenen Vorbedingungen der Geosynklinalen nicht so einfach sind, wie wir sie voraussetzen, dann wird das Strömungssystem eben auch verwickelter ausfallen. Wir haben ferner schon angedeutet, daß der Ringelreihen von Faltung und Geosynklinalbildung nicht endlos weitergeht, sondern die Geosynklinalen verlanden und der betreffende Küstenstreifen für fernerhin aus dem orogenetischen Spiel ausscheiden kann. Oder, daß der Meeresraum, der zur Verfügung bleibt, schließlich zu klein wird, um dem Mechanismus genügend Raum zur weiteren Tätigkeit zu lassen (das scheint das Schicksal der mediterranen Geosynklinalen in Europa zu sein). Und ebenso sind Möglichkeiten denkbar, wie bisher ungestörte Räume in die orogenetischen Umwälzungen hineingezogen werden könnten. Jeder Fall wird eben in seinen natürlich gegebenen Bedingungen zu studieren sein und ich zw. ifle nicht, daß sich dann ungezwungen nach den hier aufgestellten Gesichtspunkten eine Erklärung wird geben lassen. Die Mannigfaltigkeit der Natur ist aber doch zu groß, als daß man hoffen könnte sie in einer theoretischen Diskussion von vornherein in ihren Alternativen zu erschöpfen. Übrigens wird das Beispiel, das wir gewählt haben, in den weitaus meisten Fällen dem wirklichen Vorgang recht nahe kommen.

#### XI. ÖRTLICHER ZUSAMMENHANG VON VULKANISMUS UND FALTUNG.

Als Elemente des orogenetischen Strömungssystems haben wir kennen gelernt: absteigenden und aufsteigenden Konvektionsstrom (Zyklone und Antizyklone) und die verbindenden Horizontalströmungen. Im vorigen Kapitel ist klar gestellt worden, wie ihre räumliche Verteilung von den Großformen der Erdoberfläche (Kontinenten und Ozeane) anhängt. Der nächste Schritt müßte wohl sein, auf ihre gegenseitigen Beziehungen einzugehen, den Zusammenhang und die Gesetze des Strömungssystems zu erforschen. Es ist das offenbar eine analoge Aufgabe wie jene, bei deren Bearbeitung die Meteorologie bereits bemerkenswerte Erfolge errungen hat. Die dabei erreichten

Fortschritte in der Methode werden zum Teil auch unserer Arbeit zugute kommen. Allerdings ist die Meteorologie in einer wesentlich günstigeren Lage. Die physikalischen Eigenschaften des strömenden Materials sind bekannt und zwar sehr einfache. Ferner liefert ihr die direkte Beobachtung sowohl die Strömungen als die Druckgradienten und die Temperaturen an der einen Grenzfläche (und auch ziemlich weit von dieser). Endlich spielen sich ihre Vorgänge schnell ab, wiederholen sich also oft genug, um Gesetzmäßigkeiten leicht erkennen zu können.

Unsere Aufgabe ist in vieler Hinsicht schwerer. Der Beobachtung sind nur zugänglich: die Lage von Zyklone und Antizyklone, die durch Verschluckungszone des Faltengebirges und Vulkangebiete gekennzeichnet sind; die Horizontalbewegungen an der oberen Grenze der aktiven Zone, sofern ihr Ergebnis aus der Tektonik des Faltengebirges und der zugeordneten Bruchsysteme erschlossen werden kann, und die Druckverteilung an der untern Grenze der aktiven Zone, der Ausgleichsfläche, wie sie nach der heutigen Schwereverteilung geschätzt werden kann. Es liegt im Wesen der geologischen Beobachtung, daß unmittelbar nicht das Bewegungsbild irgend eines Augenblickes in seinem Zusammenhang gegeben ist, sondern daß wir bestenfalls das Endresultat der gesamten tektonischen Bewegung beobachten, vielfach aber sich die Wirkungen der einzelnen Phasen derselben Faltungsperiode, manchmal sogar Strukturen aus ganz verschiedenen durch Jahrmillionen getrennten Perioden übereinander lagern. Eine weitere Schwierigkeit erwächst daraus, daß die Antizyklone als Bewegungszentrum früher zu wirken beginnt, als die einzig zu beobachtenden Eruptiva in Erscheinung treten, daß die vulkanische Tätigkeit aber die orogenetische Strömung beträchtlich überdauert, was zu Irrtümern in der Auffassung führen kann.

Den bestmöglichen Zustand des Beobachtungsmaterials vorausgesetzt, wäre gleich anfangs die schwere und mühsame Arbeit zu leisten, diesen gordischen Knoten neben- und übereinandergeschachtelter tektonischer und vulkanischer Vorgänge wieder in das gebührende Nacheinander aufzudröseln. Von rein geologischen Standpunkt ist dieses Problem kaum eindeutig lösbar. Über die Anfangslage sind immer mehrere Annahmen möglich und von jeder von diesen zur bekannten Endlage mehrere Wege. Allein für jeden Augenblick muß das Bewegungsbild das einer möglichen Strömung sein, deren Stromlinien von der vulkanischen Antizyklone zur Faltungszyklone in jenen Kurven, die durch die Wirbelbewegung bedingt werden, ziehen, die Schollen der starren Kruste auf ihrem Rücken verfrachtend. In der Hauptsache bedeutet dies, daß zu den sonstigen tektonischen Bestimmungselementen als neues die zugeordneten gleichzeitigen Eruptionsgebiete treten, als der Ort, von dem der Schub ausgeht. Die Kenntnis dieses Elementes wird es ermöglichen, unter den tektonischen Annahmen eine Entscheidung zu treffen. Die zugeordneten Bruchsysteme liefern ein weiteres Bestimmungs-

stück, das bisher nicht entsprechend ausgenützt worden ist. An Stelle der phantasie-reichen aber unfruchtbaren Spekulationen, zu denen ihr Parallelismus bisher angeregt hat, wird die Untersuchung treten müssen, welche als primäre Leitflächen horizontaler Differentialverschiebungen, und welche als sekundäres Ergebnis der Zerrung (ev. auch Stauung) zu betrachten sind; dies ergibt dann Anhaltspunkte für Richtung und Ausmaß des Horizontalschubes.

Unzweifelhaft wäre es sehr passend, die vorstehend umrissene Methode an einem durchgeführten Beispiel zu erläutern. Als best erforschter Teil des jüngsten orogenetischen Systems käme in erster Linie das Alpensystem, mit den zugeordneten mitteleuropäischen und mediterranen Vulkan- und Bruchgebieten in Betracht. Es wäre aber unbillig, hier sofort die glatte Erledigung einer Aufgabe zu verlangen, welche durch die Bemühung ganzer Generationen von Geologen noch nicht erledigt werden konnte; der Versuch allein würde jedenfalls den verfügbaren freien Raum überschreiten. Man wird hier wohl nur schrittweise vorwärts kommen. Daß auch dabei die hier auseinandergesetzten Gedankengänge von Nutzen sein können, einige Beispiele:

Als Hauptelemente der Alpenknickung zwischen Rhein und Etsch erscheinen eine scharf ausgeprägte Zyklone in Bünden und zwei Antizyklonen, die Vulkangebiete von Venezien und von Schwaben; besonders das letztere rückt im Höhgau scharf gegen die Knickung vor. Der Schub im höheren Krustenniveau entsprechend der Horizontalströmung vom Meer zum Land wird, tangential zur vicentinischen Antizyklone, an der Etsch etwa von S nach N (vielleicht sogar etwas zu O) heraufgehen; in der Gegend der Zentralalpen muß er gegen W in den zyklonalen Wirbel Bündens eintreten. Der Schub, der vom schwäbischen Antizyklonalgebiet ausgeht, greift im tieferen Niveau an und geht am Rhein etwa von N nach S, um dann ebenfalls die Zyklone umkreisend nach O abzubiegen. Daher werden wir im judikarischen System (sog. „Etschbuchtgebirge“) den Ausdruck einer wirklichen Blattverschiebung im Alpenkörper sehen und in der Auffassung des viel umstrittenen Grenzgebietes zwischen Ost- und Westalpen für Spitz und gegen Termier entscheiden. Ob die tektonischen Einzelheiten auf solche der Strömung zurückzuführen sind, sich in der Übertragung, also der Tektonik der tieferen Krustenteile, begründen, oder in Eigenschaften der oberen Krustenteile (Festigkeit, alte Struktur, vortektonisches Relief), kann späterer Untersuchung noch offen gelassen werden. In den größten Zügen ist das tektonische Bewegungsbild der wirbelartigen Strömung des Untergrundes, die aus unsern Annahmen zu folgern ist, sicherlich adäquat.

Eruptiva, welche der alpinen Faltung zuzuordnen sind, finden sich reichlich in Ungarn; eine Gruppe derselben rückt über die steirische Grenze gegen den Ostalpenrand heran. Daß die Strömungslinien dieser Antizyklone, die sehr bedeutend gewesen sein muß, mit einem Transport ostalpiner Decken von der Drau bis vor die Tore Wiens nicht in Einklang zu bringen sind, wollen wir hier nur erwähnen; denn diese Prachtleistung der Termierschule steht aus vielen anderen Gründen ernsthaft überhaupt nicht mehr in Diskussion. Wichtig ist der von hier ausgehende O-W-Schub für die Auffassung der östlichen Zentralalpen. Wir werden daher die Radstädterfalten nicht von S nach N, sondern von O nach W (oder SO nach NW) übergelegt denken und als Fortsetzung davon den Einschub der sog. Berchtesgadener Schubmasse von SO her versuchen. Über-

haupt werden die vielfachen Anzeichen von O-W-Schub in den östlichen Zentral- und Kalkalpen in dem großen ungarischen Antizyklonalgebiet ihre ausreichende Erklärung finden.

Aus diesen Beispielen dürfte bereits mit hinreichender Deutlichkeit hervorgehen, wie die Verwendung der hier entwickelten geophysikalischen Anschauungen als Arbeitshypothese gedacht ist. Die Verknüpfung der vulkanologischen mit den tektonischen Daten, die Zusammenhänge des Strömungssystems können, wenn auch erst in den größten Umrissen erkannt, dazu dienen, unter den verschiedenen tektonischen Annahmen eine Entscheidung zu treffen, aus dem Wirrwarr der Einzelheiten mechanisch mögliche Bewegungsbilder auszusondern. Derart verknüpfen sich besser bekannte mit schwerer deutbaren Gebieten und helfen diese aufhellen. Ist auf diesem Wege eine Synthese gelungen, so wird man daran gehen können, die Regeln, um nicht zu sagen Gesetze, des Strömungssystems zu untersuchen. Und mit diesen weiteren Ergebnissen wird man an die Deutung jener Fälle gehen können, bei denen uns die Daten, wie bei den älteren orogenetischen Perioden, nur unvollkommen zugänglich sind. (Da bei diesen gerade die vulkanologischen Tatsachen besser überliefert sind als die tektonischen, dürfte die angegebene Verknüpfung hier gute Dienste tun.) Derart ist allerdings mehr ein Arbeitsprogramm zustande gekommen, als bestimmte Angaben, wie Vulkane und Faltengebirge miteinander verknüpft sind. Aber vorläufig muß es mit den hier gegebenen groben Umrissen genug sein, weil eben derzeit mehr und eingehenderes verlässlich nicht geleistet, billigerweise wohl auch nicht vom ersten Versuch verlangt werden kann.

Ein weiterer Zusammenhang zwischen Vulkanismus und Faltung kann hier nur kurz berührt werden. Becke hat darauf hingewiesen, daß zwischen den Eruptiven in und außerhalb der Faltungszonen ein wesentlicher Unterschied des Chemismus festzustellen ist (atlantisches-pazifisches Magma). Nach unseren Annahmen würde sich das dadurch erklären, daß die Reihenfolge vom Zuständen, welche das Magma durchlaufen hat, in beiden Fällen sehr verschieden ist, daher auch ganz andere Differentiationsprodukte ausfallen und schließlich zur Eruption kommen müssen. Völlig spruchreif scheint der Gegenstand heute aber selbst vom Standpunkt des Petrographen aus noch nicht zu sein. Vielleicht ließe sich aber die Schwierigkeit, die gelegentlicher Wechsel von atlantisch und pazifisch bereitet hat, durch Änderungen im Strömungssystem besser erklären, als das bisher gelungen ist.

## XII. EPIROGENETISCHE BEWEGUNGEN.

Die beiden Gruppen, die hier als orogenetische und epirogenetische Bewegungen bezeichnet werden, hat man fast immer wenn auch oft unter andern Namen unterschieden, allerdings meist so nach dem Gefühl; nach der größeren oder geringeren

Ausdehnung, Stärke und Geschwindigkeit. Eine schärfere auf das Wesen des Vorganges zurückgehende Abgrenzung kann erst auf die hier entwickelten Anschauungen begründet werden. Als orogenetische sind alle jene Krustenbewegungen zu bezeichnen, welche Teile eines echten orogenetischen langen Zyklus sind, eines erdumspannenden Strömungssystems mit wohl ausgebildeten Zyklonen und Antizyklonen, die Folge der revolutionären Zurückverwandlung des instabil gewordenen Zustandes der Tektonosphäre in den indifferenten. Epirogenetisch sind sodann die übrigen Krustenbewegungen, ihre Ursache ist nicht die Instabilität der vertikalen Schichtung, sondern Abweichungen vom Gleichgewichtszustande (wegen Dichte-, Druck-, Temperatur-, stofflicher Verteilung), ihre Form nicht die des großen Kreislaufsystems, sondern die lokaler Ausgleichsströmungen (Massenbewegung, Wärmeleitung, Diffusion). Sie sind langsamer, sanfter, nicht auf bestimmte schmale Zonen und relativ kurze Revolutionsperioden beschränkt, sie ergreifen größere Räume und dauern länger.

Ob die einzelnen kurzen Zyklen isoliert und von einander unabhängig sind, oder ob ihre Gesamtheit ebenfalls als langer Zykel, als über die ganze Erde zusammenhängender Energieaustausch anzusehen ist? Manche sind anscheinend für letztere Ansicht (so läuft Haugs Vermutung einer Reziprozität der Bewegung der Geosynklinalen und Kontinentflächen auf derartiges hinaus) und in der Tat ist die Annahme verlockend, daß alle großen Massenverschiebungen untereinander in irgend einem mechanischem Konnex stehen. Eine Andeutung dieser Art mag sein, daß bei der wahrscheinlichsten Massenverteilung<sup>1</sup> die Gebilde der Oberfläche den Erdschwerpunkt nicht gegenüber dem der mathematischen Erdgestalt verschieben. Auch eine Betrachtung ihres Einflusses auf die Rotation könnte zu ähnlichen Gedanken führen. doch liegt bei derartigen Minimumbetrachtungen ohne genauen Nachweis des mechanisch notwendigen Zusammenhanges die Gefahr des Abirrens ins Teleologische stets sehr nahe.

Gelegentlich hat man die epirogenetische Bewegungen in zwei Gruppen geteilt und den großen „säkularen“ Hebungen und Senkungen die anscheinend oszillatorischen Bewegungen kleineren Umfanges gegenüber gestellt,<sup>2</sup> die in der Stratigraphie als Schwankungen der Strandlinie so bedeutungsvoll zum Ausdruck kommen (dem geophysikalischen Maß gegenüber wahrscheinlich stark übertrieben). Gegen diese Scheidung und besonders gegen eine Periodizität der epirogenetischen Bewegungen spricht aber manches. Oszillationen an und für sich sind im Bereich der thermodynamischen

<sup>1</sup> Isostatisch kompensiert mit einem nicht kompensierten Überschuß auf den Ozeanflächen, der allerdings nicht sehr groß zu sein braucht. Vgl. Berroth, Beitr. 2. Geophysik XIV Heft 3 und 4.

<sup>2</sup> Eine sehr klare Darstellung dieser Art gibt Le Comte J., „Earth's Crust movements and their causes“. Smithsonian Report für 1896. S. 233 ff.

Vorgänge etwas abnormes, deren Wesen ist asymptotische Annäherung an einen Gleichgewichtszustand. Auch für die rein mechanischen Ausgleichsbewegungen der Kruste wird man mit Rücksicht auf die Dämpfung durch sehr große Reibung und kleinen Geschwindigkeiten ein Hin- und Herpendeln ausschließen. Die anscheinende Periodizität könnte nun durch einen andern (äußern) grundsätzlich periodischen Kräftekomplex hineingetragen werden, oder sie sind die Abbildung des gegenseitigen bald Voreilens bald Zurückbleibens von mehreren wechselwirkenden, einzeln stets gleichsinnig, aber mit veränderlicher Geschwindigkeit laufender Vorgänge, oder sie erscheint bloß in den Beobachtungen verursacht durch nicht erkannte Schwankungen des Bezugssystems. Äußere periodische Einwirkungen sind ja gewiß vorhanden (alles was mit Rotations- und solaren Einflüssen zusammenhängt z. B.) und verursachen geologische Periodizitäten niedriger Ordnung (Klimaschwankungen, regelmäßiger Wechsel des Sedimentes, Schichtung usw.), als Ursache von Krustenbewegungen, wie die extremen astronomischen Theorien wollen (Croll, Blytt und and.), werden wir sie aber nicht anerkennen; denn eine Prüfung von Energiebilanz und -Gefälle (wie in Kap. II) fällt ungünstig aus. Ein Beispiel für den zweiten Fall liefert die hier entwickelte Auffassung der orogenetischen Bewegungen; dafür ist aber der einzige hierfür brauchbare aller möglichen Mechanismen, wie wir nachgewiesen haben, vergeben. Die dritte Vermutung, daß die Periodizität erst in die Beobachtungen durch das gewählte Null-Niveau, das so vielfach kontrovers beeinflusst ist, hineingetragen wird, ist durch die deutliche Abhängigkeit gewisser Strandverschiebungen von der geographischen Breite schon seit langem angeregt worden.<sup>1</sup> Mit völliger Gewißheit läßt sich hier nicht entscheiden, ich glaube aber, daß man den Tatsachen am besten gerecht wird, wenn man daran festhält, daß eine echte Periodizität nur den orogenetischen Vorgängen zukommt, die der epirogenetischen nur scheinbar ist, z. T. ein Spiegelbild der ersteren, z. T. in irgend einer der vorerwähnten Arten hineingetragen.

Vom gleichen Standpunkt aus werden wir es ablehnen, daß epirogenetische Bewegungen Gleichgewichtsstörungen selbständig schaffen oder einseitig vergrößern.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sueß Ed. Über die vermeintlichen säkulären Schwankungen einzelner Teile der Erdoberfläche. Verh. d. K. K. geol. R. A. 1880.

<sup>2</sup> Trabert (Lehrbuch der kosmischen Physik. Leipzig 1911, S. 653) begründet die Entwicklung der Ozeanbecken damit, daß wegen der stärkeren Abkühlung durch das Wasser die sie tragende Säule eine stärkere Kontraktion als unter den Kontinenten erfahren müßte, und daß daher ihr Boden relativ zum Land immer weiter sinken, die Becken also immer

mehr eingesenkt werden müßten. (Was gewissen Ansichten der Amerikaner jedenfalls sehr nahe steht). Es ist aber ganz unzulässig, so wie er es tut, eine mittlere Temperaturverminderung der ganzen Säule bis zum Erdmittelpunkt hinab in Rechnung zu stellen, anstatt wie richtig nur bis zur Ausgleichsfläche hinab, deren Existenz eben die Folge der bei größeren Gleichgewichtsstörungen eintretenden Ausgleichsströmungen ist.

In einer Richtung kann ja wohl gelegentlich eine Verschärfung der Gegensätze stattfinden; dann muß aber gleichzeitig anderweit ein um so beträchtlicherer Schritt zum Gleichgewicht hin erfolgen. Das ist einfach eine Folge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.

Der Hauptfaktor der Veränderungen auf der Erde sind die orogenetischen Prozesse. Durch sie wird dem Kontinent eine Zone nach der andern angeschweißt, einzig durch sie wird das Relief der Erdoberfläche verstärkt. Langsam, still, aber andauernd bröckeln die epirogenetischen Ausgleichsbewegungen Stein um Stein von diesem Bau. Und auf der orogenetisch ruhigen Seite des Kontinents (atlantischer Küstentypus) haben sie die Oberhand, hier sinkt der Kontinent wieder zum mittleren Krustenniveau hinab.

Damit erhalten wir zugleich ein Maß für die Geschwindigkeit: Auf die Aeonen gerechnet halten sich orogenetische und epirogenetische Wirkungen die Wage, ebensoviel als erstere auf der einen Seite des Kontinents in wiederholtem Titanensturm emporgetürmt haben, ebensoviel bröckelt auf der Rückseite im Laufe der Ruheperioden wieder ab. Der Kontinent scheint seine Größe nicht zu ändern, er scheint sich nur zu verschieben. Zwischen der vorletzten und der letzten Gebirgsbildungsperiode liegt ungefähr das ganze Mesozoikum, gewonnen (z. T. bloß zurückgewonnen) wurde der Streifen der Alpen bzw. der anderen Kettengebirge des Tertiär. So ziemlich die ganze geologische Zeit hat es gedauert bis die Faltungszonen aus dem NW Europas (Schottland-Norwegen) bis zur heutigen Lage, also etwa um die Breite des Kontinentes vorgerückt ist. Die Zeit, welche derart eine Entwicklungsreihe: Kontinent — Ozean — neuer Kontinent brauchen würde, ist ungeheuer. Ob man die Annahme überhaupt gelten lassen kann, daß die immerhin zerstörbaren geologischen Urkunden nach dieser Zeit noch auch nur andeutungsweise entzifferbar auf uns kommen? Sicherlich stehen wir hiermit an der Grenze, welche der Geologie nach Wesen und Methode gesetzt sind. Rein physikalisch gesprochen, ist die Größenordnung der epirogenetischen Bewegungsgeschwindigkeit dieselbe, wie die der typischen Ausgleichsvorgänge, der Wärmeleitung und der Diffusion.

Ein Vergleich der orogenetischen und epirogenetischen Vorgänge wird die Eigenart beider genauer erkennen lassen:

	orogenetische Vorgänge	epirogenetische Vorgänge
Ursache	Instabilität der vertikalen Schichtung	Abweichungen vom Gleichgewicht

	orogenetische Vorgänge	epirogenetische Vorgänge
Energie-Austausch	von unten nach oben geschlossen über die ganze Kugeloberfläche: langer Zykel Von Natur periodisch	hauptsächlich in horizontaler Richtung von nah zu nah: kurze Zykel nur scheinbar periodisch
Typische Bewegungsform der aktiven Zone:	Vertikaler Konvektionsstrom	horizontaler Ausgleichsstrom
Geschwindigkeit im Verhältnis zu Wärmeleitung, Diffusion etc.	eine ganze Größenklasse höher	von etwa gleicher Größenordnung
Wärmeleitung, Diffusion, chemische Verschiedenheiten, Erosion u. s. w.:	bestimmen die Anfangslage, Ablauf davon fast ganz unabhängig	bestimmen den Ablauf, Anfangslage orogenetisch, d. i. fast autonom gegeben
an der Oberfläche:	Arbeit gegen die Schwere, Vergrößerung des Schwerepotentials, Verschärfung des Reliefs	(Im ganzen) Arbeit mit der Schwere, Verkleinerung des Schwerepotentials, Verflachung des Reliefs
Typische Tektonik:	Faltung, Zerrung, Blattverschiebung	Flexuren, Hebungs- und Senkungsbrüche
Ergebnis im großen:	Baut die Kontinente durch einseitiges Anschweißen von Faltenzonen auf	Läßt orogenetisch zur Ruhe gekommene Kontinentaltafeln allmählich wieder aufs allgemeine Krustenniveau hinabsinken.

### XIII. VULKANISMUS UND GEOSYNKLINALBEWEGUNG.

Die Bewegungen in der Geosynklinalzone sind auch in Zeiten orogenetischer Ruhe wesentlich größer und schneller als die des „Dauerlandes“; denn hier sind die Unregelmäßigkeiten und Abweichungen vom idealen Gleichgewichtszustande am engsten zusammengedrängt. Hier werden wir daher am ehesten hoffen dürfen, über die Zu-

sammenhänge der epirogenetischen Vorgänge untereinander, mit den orogenetischen und mit der gegebenen Oberflächengestaltung einige Aufschlüsse zu erzielen. Mit Verzicht auf systematische Behandlung, soll hier hauptsächlich an der Hand einiger mir naheliegender Beispiele eine Spur solcher Zusammenhänge besprochen werden:

Von der jungpaläozoischen Faltung im Alpengebiet ist als sicheres Relikt nur die Karnische Hauptkette erhalten geblieben; wahrscheinlich war es eine Randkette, denn weiter südlich treffen wir keine Spuren dieser Faltung, dagegen schließt sich die nunmehr entwickelnde mesozoische Geosynklinale unmittelbar an, bereits ihre ersten Transgressionen (Ober-Karbon und permokarbonischer Fusulinenkalk) greifen wieder über die Faltenzüge über. SW von der Karnia liegt eines der großen antizyklonalen Vulkangebiete, welche dem variscischen Gebirge zugeordnet sind, der Bozner Quarzporphyr. Die beiden vorerwähnten Transgressionen waren kaum bis an den Rand des vulkanischen Gebietes vorgedrungen (vom W kommend trifft man z. B. in Sexten die letzten Quarzporphyrströme und den ersten Fusulinenkalk als Gerölle), auch die nächste, die des Bellerophonkalkes an der Perm-Triasgrenze, in der Inner-Carnia eine mächtige Ablagerung von einigen hundert Metern, konnte nur ein kleines Stück hinaufbranden. Erst Mitte der Trias wurde das Bozner Gebiet in die Absenkung der Geosynklinale hineingezogen. Sehr kurze Zeit nach Beginn dieser Senkung tritt hier abermals Vulkanismus auf, und dessen Raum (Fassa-Gröden-Enneberg) bleibt wieder in der Absenkung wesentlich gegen seine Nachbarn zurück (Beweis dessen die Reduktion seiner folgenden Sedimentserie um fast 1000 m gegenüber diesen, terrigene Spuren im Sediment u. a.).<sup>1</sup>

Das andere permische Vulkangebiet der Südalpen, der Porphyr von Lugano hat sich noch dauerhafter bewiesen. Er blieb das ganze Mesozoikum durch Schelfrand der südalpinen Geosynklinale, während die nächste Nachbarschaft (Comerseegebiet) geradezu außerordentlich absank.<sup>1</sup> Die Reihe analoger Beispiele ist leicht zu erweitern: Nach der tertiären Alpenfaltung setzt die Senkung in ihrem „Rückland“ ein, am Po und in Friaul und zwar in beträchtlichem Ausmaße; denn keine der Bohrungen hat bisher das Pliozän oder sonst eine marine Schicht angetroffen, stets nur abgesunkene terrestrisches Diluvium. Nur ein Rücken ist stehengeblieben, kenntlich auch dort, wo die älteren Gesteine oberflächlich verhüllt sind, an den Ergebnissen der Schweremessungen, es ist dies die Gegend der tertiären Vulkane, Verona, Vicenza, Padua.<sup>2</sup> Ein anderes: der Zentrigranit der hohen Tauern ist wahrscheinlich eine karbonische

<sup>1</sup> Vgl. hierzu Schwinner R. „Analogien im Bau der Ostalpen“. Centralbl. f. Mineral. etc. 1915. S. 52ff, und „Dinariden und Alpen“, Geolog. Rundsch., Dd VI. 1915, S. 1,

<sup>2</sup> Deecke, W. „Der geologische Bau der Apenninenhalbinsel und die Schweremessungen“. Neues Jahrb. f. Min. etc. Festband 1907.

Intrusion (der variscischen Faltung zugeordnet); er hat sich das ganze Mesozoikum durch als eine die alpine Geosynklinale teilende Geoantiklinale bahauptet. Wahrscheinlich ist das Beharren des Aarmassives als Schelfrand analog aufzufassen. Eine große Senkung der jüngsten Zeit ist die ungarische Tiefebene; Aufragungen älterer Gesteine, Inselhorste, welche sich der Senkung entzogen haben, treffen wir nur in den Gebieten derselben, wo tertiäre Eruptionen stattgefunden haben.<sup>1</sup> Hier ist auch daran zu erinnern, daß vulkanische Inseln so häufig vorkommen, daß dies fast synonym mit ozeanische Insel zu sein scheint. Reine Aufschüttungsgebilde (Vulkan, Korallen) sind wohl nur wenige, dagegen hat sich oft, verdeckt und versteckt, altes Gestein nachweisen lassen, also: Zurückbleiben in einer allgemeinen Senkung oder Hebung.

Aus vorstehendem läßt sich als vielfach zutreffende Regel ableiten, daß Gebiete mit jungen Vulkanen die Absenkung der benachbarten oder sie umgebenden Geosynklinale nicht mitmachen, zum mindesten lange Zeit derselben widerstehen, oder in der Absenkung relativ zurückbleiben. Aus unseren Annahmen folgt ungezwungen die Erklärung dafür: das Vulkangebiet ist durch das an seiner Basis liegende Magmabassin geschützt, also der Abkühlungskontraktion und Senkung kaum unterworfen; die Antizyklone hat Minderschwere, also eher Hebungstendenz die mehrmalige chemische Sonderung hat eine sehr stabile Schichtung hinterlassen, in der von Natur spezifisch leichteres immer oben liegt; schließlich wird ein von Anfang relativ erhöhtes Gebiet kaum beträchtliche Sedimentlasten empfangen, eher durch Erosion entlastet werden. Das ist in allem das direkte Gegenteil von den Verhältnissen der Geosynklinale und es ist ganz natürlich, daß ein solches Gebiet, obwohl vielleicht ganz nahe benachbart, sich den Bewegungen jener (deren wesentlichste Tendenz eben die fortschreitende Senkung ist) entzieht.

Man muß aber bedenken, daß die einzelnen Vulkangebiete im Verhältnis zur Geosynklinale nicht sehr groß sind und häufig Enklaven darin bilden. Bei langem und intensiven Absinken der letzteren kann die Lage eines derartigen isolierten vulkanischen Horstes unhaltbar werden. Die Geosynklinale assimiliert nach und nach durch die Ausgleichsströmungen, die mit zunehmender Höhendifferenz einsetzen und wachsen,

<sup>1</sup> Lozinsky, W. v., Vulkanismus und Zusammenschub". Geolog. Rundsch. Bd. IX. 1918, (S. 69, 79, 92 ff.) versucht sogar, die ungarische Tiefebene als „Hochland“ aufzufassen. Das ist wohl etwas übertrieben, denn eine Senkung ihres Bodens (ohne Alluvionen) unter den Meeresspiegel und relativ zur Umrandung ist nicht zu bestreiten. Auch von den erwähnten Inselhorsten wird man kaum mehr behaupten

können als, daß sie gegen die allgemeine Senkung ihren Platz behauptet haben; Hebung ist zweifelhaft und geringer als in den Randgebirgen. Mit der nötigen Reserve können wir aber diesen Autor mit diesem (und den weiteren Beispielen, die er a. a. O. bringt) als Eideshelfer für unsere Auffassung in Anspruch nehmen.

seinen Untergrund und die durch die Eruptiva markierte Scholle verliert ihre geophysikalische Ausnahmestellung, sie folgt von da ab als Teil der Geosynklinale wie die anderen deren allgemeinen Bewegungen. Die schrittweise Einverleibung des Bozner Porphyrschildes in den südalpinen Trog kann als Beispiel für diese Entwicklung dienen. (Die Weiterverfolgung dieses Beispiels könnte zu der Vermutung führen, daß damit ein Wiedererwachen des Vulkanismus in Beziehung stehe, doch bleibt dies, mangels weiterer Beispiele, besser noch in Schwebe.)

Im ersten Beispiele haben wir gesehen, daß die Senkung der südalpinen Geosynklinale nicht bloß das Bozner Antizyklonalgebiet, sondern auch die Randkette des alten Gebirges in ihr Bereich gezogen hat, und Beispiele dieser Art ließen sich mehr geben. Die epirogenetischen Bewegungen, deren Wesen es ist, die orogenetischen übertriebenen Gleichgewichtsstörungen auszugleichen, sind eben gelegentlich im Stande lokal diese Entwicklung rückläufig zu machen, einen Teil des Raumverlustes für den Ozean zurückzuerwerben. Ein Beispiel analoger epirogenetischer Tendenz ist die Rücksenkung der Alpen nach ihrer Auffaltung (Heim). Unmittelbar an das Ausklingen der orogenetischen Störung schließt sich die epirogenetische Ausgleichung (mit entgegengesetzter Bewegungstendenz) an. Man könnte geradezu von einer epirogenetischen Abtragung sprechen, es ist das beste Analogon zur oberirdischen Erosion.

#### SCHLUSSWORT.

Daß die hier gegebene Darstellung noch nicht als ganz fertig und abgeschlossen gelten kann — und das obwohl das Horazische *Nonum prematur in annum*, in der Hauptsache wenigstens, beachtet worden ist — muß zugegeben werden. Aber den Gegenstand wirklich zu erschöpfen, geht sicher über die Kraft eines einzelnen; eine Anzahl wichtige Fragen blieb offen z. B., ob die Erde sich wirklich kontrahiert, ob Polverschiebungen stattgefunden, das absolute Zeitmaß und manches andere. Ich betrachte es aber geradezu als einen Vorzug, daß hier die Entscheidung in manchen letzten Fragen nicht vorweg genommen werden mußte; desto mehr Spielraum bleibt für Verbesserung der Anschauungen, desto größere Anpassungsfähigkeit an neue Tatsachen.

Wo es aber bereits möglich schien abzuschließen, habe ich stets versucht dafür den schärfsten und präzisesten Ausdruck zu finden, nicht verschwommene Wortbilder, sondern die klaren termini technici der Physik u. ähnl. zu verwenden.

Ausführliches Eingehen auf tektonische Probleme war hier nicht am Platz. Darum wurde nur darauf hingewiesen, daß die Übertragung der faltenden Kraft durch tangential Reibung an die Festigkeit der dünnen Schichttafeln nicht so ungebührliche

Anforderungen stellt, wie die Kontraktionstheorie und daß sie die Unsymmetrie der Falten als Regel viel besser erklärt, als die geltenden Anschauungen. Darauf einzugehen, daß dies Änderungen in den Auffassungen des ganzen Faltungsmechanismus bedingt — wie mir scheint, sehr vorteilhafte — muß einer späteren Arbeit überlassen bleiben. Auch das Verhältnis der einzelnen Teile der Faltengebirgssysteme, Zusammenschluß und Trennung (Scharung, Virgation, Biegung, Knickung usw.) wird unter neuen Gesichtspunkten zu betrachten sein und zwar im Licht klarer physikalischer Bilder, nicht bloß im schwankenden Zwielficht geographischer Homologien.

Graz, Geologisches Institut der Universität, im Mai 1919.