

Über die Kräfte bei der Bildung der Erdkruste

Von W. WUNDT¹, Freiburg i. B.

Die Untersuchungen, die sich mit der Bildung der Erdkruste beschäftigen, sind ungemein zahlreich. In manchen Punkten ist Einigkeit erzielt worden: verschiedene Hypothesen haben ihren berechtigten Kern zu einer Theorie ausbilden können, die in gewissem Umfang auch von der Kritik anerkannt wird. Aber eine *einheitliche* Anschauung konnte sich bis jetzt nicht durchsetzen. Insbesondere herrscht über die *Kräfte*, die bei der Bildung der Erdkruste mitwirken, noch keine Klarheit. Zu dieser Frage soll hier ein Beitrag geleistet werden!

Die *Kontraktionstheorie* hat sich, nachdem sie in der von SUESS aufgestellten Form schweren Bedenken begegnet war, in veränderter Form, vor allem durch Beschränkung auf *geringe* Zusammenziehung, doch behaupten können. Was ihr entgegengehalten wird, ist, daß sie den Pressungen in den tiefliegenden Teilen nur eine schwache Dehnung in den Faltensätteln gegen-

obersten 10 km der Erdkruste genügen, um den vorhandenen Wärmestrom aus dem Erdinnern zu erklären. Aber gerade dieser Umstand weist darauf hin, daß man die Rolle der Radioaktivität nicht überschätzen darf; es hat wohl nur eine Anreicherung von radioaktiven Stoffen in der äußersten Rinde stattgefunden; jüngere Granite unterscheiden sich in dieser Beziehung wesent-

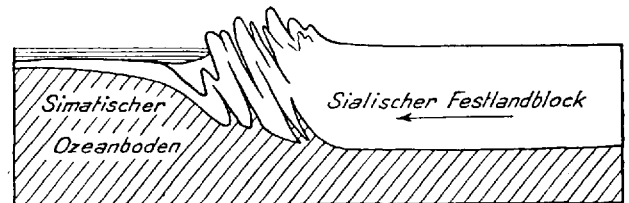


Abb. 2. Kontinentenverschiebung. Skizze nach H. SCHMIDT, Geologie I (1947).

lich von den älteren. Auch ist der rhythmische Verlauf der Erdgeschichte auf diese Art nur schwer zu begründen. — Die *Kontinentalverschiebungstheorie* von A. WEGENER legt den Schwerpunkt der Erdkrustenbildung auf die horizontalen Kräfte: die Festländer stellen leichte Schollen (Sialmassen) dar, die im Schwimmgleichgewicht auf den schwereren Simamassen dahindriften und sich beim Auftreffen auf Widerstände auf falten (Abb. 2). Aber die treibenden Kräfte (Polfluchtkraft und Westdrift) erscheinen nach den Berechnungen zu klein, als daß man ihnen große Gebirgsfaltungen

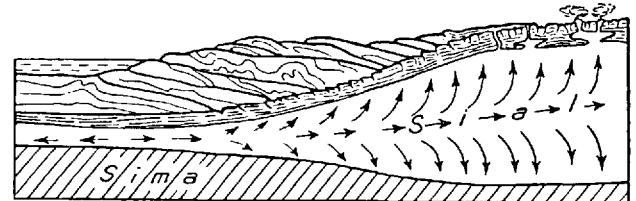


Abb. 3. Oszillationstheorie. Skizze nach KAYSER-BRINKMANN, Geologie I (1940).

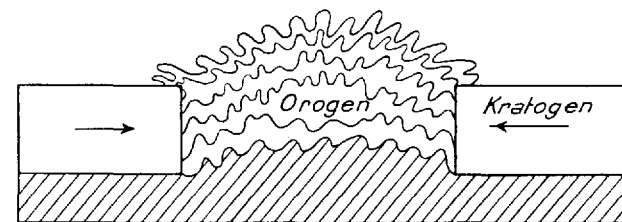


Abb. 1. Kontraktion. Skizze nach H. SCHMIDT, Geologie I (1947).

überstellen könne und dadurch den ausgedehnten Erscheinungen der Zerrung und Grabenbildung nicht voll gerecht werde (Abb. 1). Die entgegengesetzte Hypothese von einer allgemeinen *Ausdehnung* der Erde hat wenig Beifall gefunden; wir werden um die Annahme einer allmählichen Zusammenballung aus dem ursprünglich glutflüssigen Zustand nicht herumkommen (DALY, 1933). Es bleibt uns also der Mittelweg, in den Zeiträumen der historischen Geologie eine kaum merkliche Zusammenziehung anzunehmen — die, wie wir sehen werden, so gering ist, daß sie für die Gebirgsbildung außer Betracht bleiben kann. — Eine andere Gruppe von Forschern (JOLY, KIRSCH u. a.) sucht die Hauptursache der Gebirgsbildung in *radioaktiven Vorgängen*. Durch Zerfall der Uranerze kann, wie die Rechnung übereinstimmend zeigt, eine gewaltige Wärmemenge frei werden; diese ist so groß, daß schon die

zutrauen könnte. — Eine weitere Gruppe von Forschern (HAARMANN, STILLE, BUCHER) nimmt *Oszillationen* (Pulsationen) in der Magmaschicht unterhalb der festen Erdkruste an: es bilden sich dort Wellenberge (Tumore) und Wellentäler (Depressionen), an deren Abhängen die feste Erdkruste abgleitet und zu Faltungen und Zerrungen Anlaß gibt (Abb. 3). Als erregende Kräfte nimmt HAARMANN kosmische Ursachen

¹ Universität Freiburg i. B.

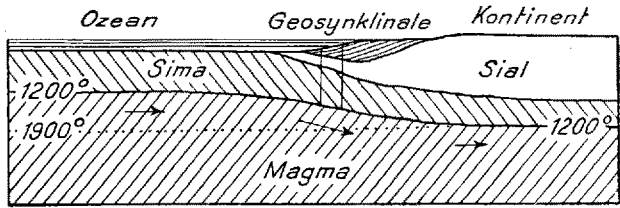


Abb. 4. Unterströmungen nach RITTMANN. Skizze nach H. SCHMIDT, Geologie I (1947).

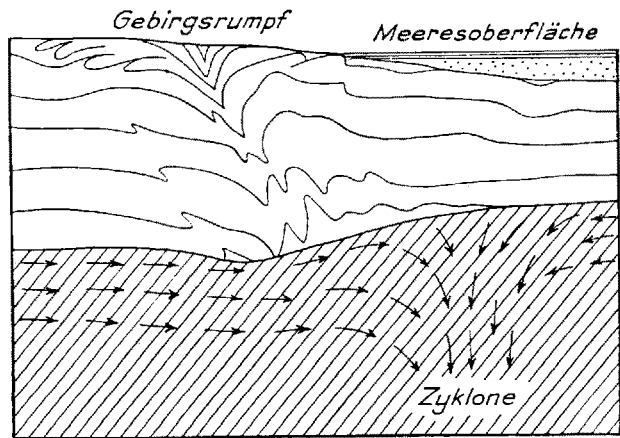


Abb. 5. Unterströmungen nach SCHWINNER. Skizze nach KAYSER-BRINKMANN, Geologie I (1940).

an. Aber abgesehen davon, daß solche kosmischen Kräfte ja erst gefordert werden müssen – wie soll man sich bei ihnen eine solch einseitige und örtlich differenzierte Wirkung vorstellen? – CLOOS hat durch seine Versuche mit plastischem Ton die *Tektonik* der großen Grabenbrüche verständlich gemacht und dadurch große Fortschritte erzielt; aber über die bei diesen Vorgängen wirkenden Kräfte spricht er sich nicht näher aus. – RITTMANN (Abb. 4), SCHWINNER (Abb. 5), AMPFERER (Abb. 6) u. a. haben das Ursachenproblem vom *thermodynamischen Standpunkt* aus angegriffen: die Erdkruste geht in gewisser Tiefe (etwa 60 km) in einen zähflüssigen Zustand über, der langsamen Strömungen, ähnlich denen der Atmosphäre, gestattet. Die dabei angenommenen Strömungsbilder weichen aber stark voneinander ab! RITTMANN führt aus, daß an der Basis der kristallisierten Erdkruste eine Temperatur von 1200° herrsche; dieser Zustand werde bei den Ozeanen in 40 km, unter den Kontinenten erst in 70 km Tiefe erreicht. Die zum Kontinent langsam absinkende Strömung beeinflusst auch die Rindenteile und ruft dort Vulkanismus hervor. Eine ähnliche Ansicht finden wir bei AMPFERER¹, der die Gleitvorgänge mit Verschluckungszonen verbindet. CADISCH² greift diese «Verschluckungstheorie» auf, indem er während der Aufaltung eines Kettengebirges eine weitgehende Versenkung von dessen Unterlage begründet. Damit wird ein

von E. KRAUS¹ geäußelter Gedanke weitergeführt. Nach SCHWINNER steigen die erhitzten Massen im Untergrund der Festländer auf, fließen nach außen unter die Kühlflächen der Ozeane ab und sinken dort hinunter. Ursache all dieser Bewegungen sind Wärmevorgänge, deren Ursprung (wenigstens teilweise) radioaktiv gedeutet wird. – Ich werde mich der thermodynamischen Erklärung anschließen, aber über den Ursprung der Wärme und die Strömungsbilder zu wesentlich anderen Ergebnissen gelangen. – Eine Anschauung, die den Vorgang der Gebirgsbildung einfach auf *Isostasie* zurückführt, ist in Abb. 7 dargestellt: Das Magma drückt am Rande der Festländer die dort lagernden leichten Sialmassen in die Höhe; dadurch entstehen die Küstengebirge. Aber diese werden durch die Einwirkung des Regens und des Windes wieder abgetragen und der Schutt am Rande der Kontinente abgelagert. Das durch Abströmen des Magmas entstandene Defizit wird auf diese Art ersetzt und es entsteht ein Massenkreislauf. So richtig diese Auffassung ist, so wird doch nicht beantwortet, wie diese Unterschiede in der Anordnung des Magmas entstanden sein sollen und warum nicht längst alles ausgeglichen ist. – Eine mathematische Behandlung dieses Problems bietet PREY², wonach die leichte Sialmasse das Bestreben haben muß, sich gleichmäßig über die schwerere Simamasse auszubreiten, ferner die *Dehnungstheorie* von GUTENBERG³. Danach ist der Gondwanakontinent, der sich im Permkarbon um den Südpol lagerte, allmählich zu den Einzelkomplexen Südamerika, Afrika, Indien, Australien und Antarktis auseinandergezogen worden, wo-

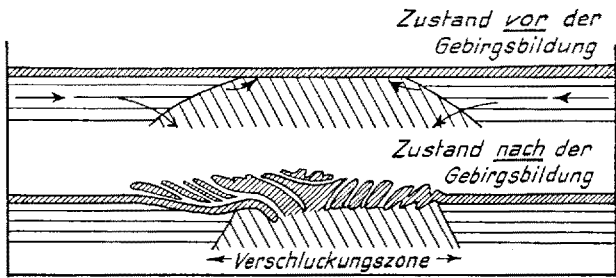


Abb. 6. Unterströmungen nach AMPFERER. Skizze nach AMPFERER, Jb. K. K. Geol. Reichsanstalt 69 (1911).

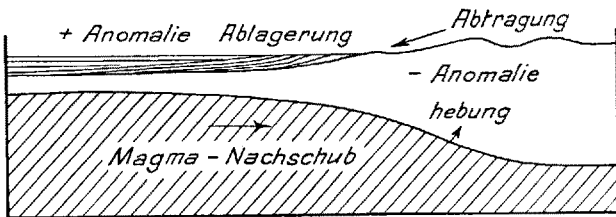


Abb. 7. Isostasie. Skizze nach H. SCHMIDT, Geologie I (1947).

¹ O. AMPFERER, Sitz. Ber. Akad. Wien, Math. Nat. Kl. I (1942).
² J. CADISCH, Exper. 2, 18 (1946).

¹ E. KRAUS, Forsch. u. Fortschr. 13, 139 (1937).
² A. PREY, Exper. 4, Fasc. 3, 88 (1948).
³ MÜLLER-POUILLETS Lehrbuch der Physik 5. Bd., 1. Hälfte: Physik der Erde, (Braunschweig), 11. Aufl., (1928). Zitiert wird aus den Beiträgen von GUTENBERG (Kap. IX und X).

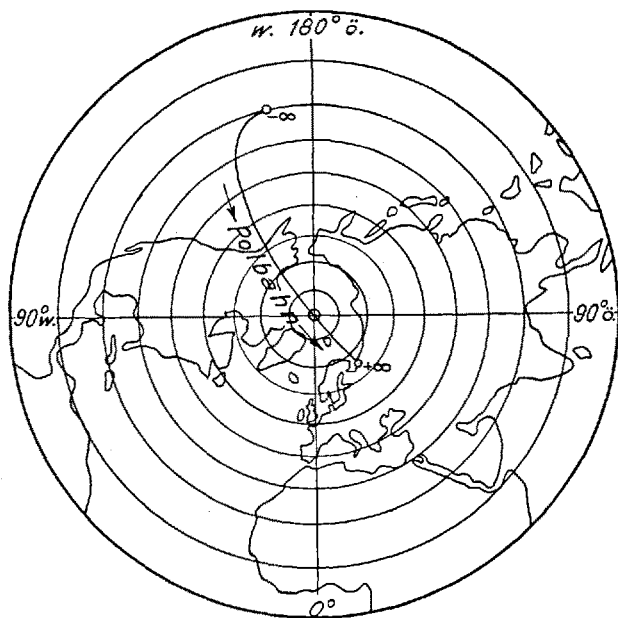


Abb. 8. – Skizze nach MILANKOVITCH, Erdbestrahlung (1941).

bei die dünnen Stellen der gedehnten Masse heute vom Südatlantik und Indik eingenommen werden. Diese Hypothese berührt sich in gewisser Hinsicht mit der Theorie von A. WEGENER. Wenn gegen beide Auffassungen eingewandt wird, daß sie von einem willkürlich gewählten Anfangsstadium ausgehen und daß sich im Laufe der Zeiten ein Gleichgewichtszustand hätte einstellen müssen, so kann auf die PICKERINGSche Hypothese verwiesen werden. Diese faßt den Pazifik als eine heute noch nicht vernarbte Wunde im Erdkörper auf, die der Mond bei seiner Ablösung hinterlassen hat. Die Kontinentalschollen suchen diese Lücke allmählich auszufüllen, werden aber teils durch die Starrheit der äußeren Schichten, teils durch andere Kräfte, wie Polfluchtkraft und Westdrift, daran gehindert, so daß wir heute noch von jenem Ziel weit entfernt sind. In diesem Zusammenhang ist die Berechnung von MILANKOVITCH¹ zur Wanderung der Erdkruste über den Erdkern anzuführen: Nimmt man, wie allgemein anerkannt, für die Kontinentaltafeln (Sial), die das Meer unterlagernde Masse (Sima) und die tiefer liegende fluidale Zone verschiedene Dichten an, so ist die Erdkruste in ihrer heutigen Lage nicht im Gleichgewicht, strebt vielmehr einer Endlage zu, bei der der Nordpol in die Gegend der Petschoramündung (Nordrußland) zu liegen kommt, während eine Rückwärtsberechnung zu einer Anfangslage im nördlichen Pazifik führt – in guter Übereinstimmung mit den geologischen Ergebnissen, die für den Nordpol im Karbon eine solche Lage vermuten lassen. Allerdings ist diese Berechnung unter der Voraussetzung gemacht, daß die Kontinente während der ganzen Zeit ihre gegenseitige Lage beibehalten haben; aber als Annäherung für die Epoche, in der wir

stehen, wird sie Geltung haben und durch die Veränderlichkeit der gegenseitigen Lage, die nicht in die Berechnung einbezogen worden ist, kommen wir von dem festen Anfangs- und Endzustand los.

Es ist noch nicht versucht worden, für all diese Theorien, die einander teilweise widersprechen, eine Synthese zu finden. Wer eine solche anstrebt, muß vor allem gewisse Einseitigkeiten vermeiden: Man kann nicht grundsätzlich *horizontale* Kräfte ins Auge fassen und die *vertikalen* außer acht lassen; noch weniger darf man die *thermodynamischen* Vorgänge zugunsten der rein *mechanischen* vernachlässigen. Alle diese Kräfte sind unter Beachtung des ihnen zukommenden Gewichts zur Erklärung heranzuziehen. Ferner sind mögliche Ursachen auch nach ihrer Wahrscheinlichkeit zu beurteilen: wenn wir eine Ursache auf der Erde selbst finden können, dann ist sie einer solchen vorzuziehen, die im Kosmos gesucht wird und erst *ad hoc* postuliert werden muß.

Was bei der Kontraktionstheorie nicht genügend beachtet wurde, ist, daß sich die Zusammenziehung in *differenzierter* Weise vollzieht – anders unter dem Meeresboden als unter den Festländern. Da das Meerwasser seine größte Dichte in der Nähe von 0° erreicht, sammeln sich am Grunde der Tiefsee die kalten Massen, teils von der Oberfläche her durch Nachsacken, teils von den Polargegenden her durch Tiefenströmungen. So herrscht auf einer Fläche, die wir auf die Hälfte des Erdteils schätzen können, am Meeresgrund eine Temperatur, die dem Gefrierpunkt naheliegt, während die Flächen unter den Kontinenten in gleicher Tiefe etwa 150° aufweisen müssen! Auf diesen Wert führt die geothermische Tiefenstufe der Festländer, die roh 1° Temperaturzunahme auf je 30 m ergibt. Es entsteht also in 3 bis 4 km Tiefe eine gewaltige Temperaturdifferenz in horizontaler Richtung, die auch gegen das Erdinnere nur ganz allmählich abklingt. Und diese Temperaturdifferenz herrscht *dauernd*, denn sie wird durch den Nachschub kalten Wassers von oben ständig aufrecht erhalten. Daraus folgt zunächst – nach Untersuchungen von TRABERT¹, die wenig beachtet worden sind –, daß sich die Erdkruste unter den Meeren relativ stärker zusammenzieht als unter den Festländern. Die Tiefseareale sind gewissermaßen schwärende Wunden am Erdkörper, die sich infolge der dauernden Abkühlung immer weiter vertiefen. Infolgedessen haben die kühleren und dadurch *schwereren Massen* unter den Ozeanen die Tendenz, *sich* unter die anstoßenden Festländer *hinunterzuschieben* (Abb. 9 und 10). Dieses Bestreben der *ozeanischen Kühlböden* ist mit den polaren Antizyklonen in der Atmosphäre vergleichbar: die Luftmassen sacken unter ihrem eigenen Gewicht zusammen und suchen sich nach allen Richtungen hin auszubreiten, wobei die leichteren Massen der Umgebung passiv auf sie aufgleiten. Der passiven Hebung der

¹ M. MILANKOVITCH, Kanon der Erdbestrahlung (Belgrad 1941).¹ E. TRABERT, Lehrbuch der kosmischen Physik (Berlin 1911).

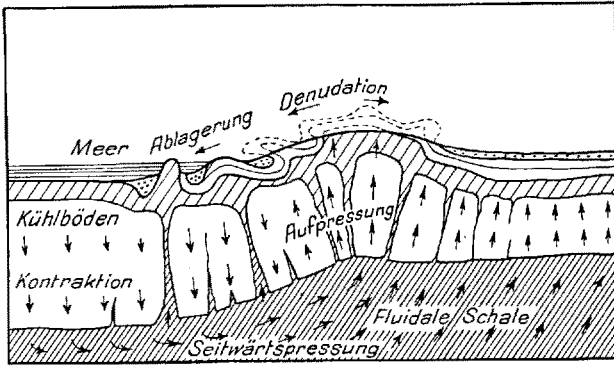


Abb. 9. Materialkreislauf am Festlandrande.

Luftmassen entspricht an den Rändern der Ozeane die Emporwölbung der Ränder: es entsteht das Phänomen der *Randschwellen*, das von JESSEN¹ ausführlich beschrieben worden ist und auf differenzierte Abkühlung zurückgeführt wird. Aber auch die Randschwellen werden — auf lange Zeit hin betrachtet — in dem Maße abgetragen, als sie aufgebaut werden, und es entsteht eine *Sedimentation* größten Stils in den *Schelfen*. Die Entstehung der Schelfe, einer merkwürdigen Stufe im Vorland der Kontinente, wird hiedurch eigentlich erst erklärt! Die Überlastung der Festlandränder mit Sedimenten führt dann dazu, daß der durch die Abkühlung eingeleitete Vorgang aufrechterhalten wird — neue Massen werden unter die Kontinente hinuntergedrückt und in der einzig möglichen Ausweichrichtung, nach *oben* hin, weitergepreßt. Aber die emporgedrückten Massen unterliegen der Denudation, werden ins Meer geschwemmt und erneuern den Druck, der sich vorher durch unterirdische Verschiebungen auswirkte. Dieser Kreislauf kann niemals zur Ruhe kommen, solange es Meer und Festland gibt, denn er beruht auf der *differenzierten Abkühlung* der Ozeane und der Kontinente. Er ist die *eigentlich treibende Kraft im Relief der Erde*.

Aber wir müssen prüfen, ob die geophysikalischen Ursachen auch quantitativ die große Rolle rechtfertigen, die wir ihnen zuschreiben. Da ist zunächst der *Wärmestrom aus dem Erdinnern*, dessen Stärke aus der Größe der geothermischen Tiefenstufe erschlossen werden kann. Je nachdem man für diese Stufe als Mittel-

wert 25—40 m annimmt, kommt man auf 75 bis 50 cal, die einem Quadratcentimeter Erdoberfläche im Laufe eines Jahres aus dem Erdinnern zufließen. Dies ist nur ein sehr kleiner Betrag gegenüber 255000 cal, die ein Quadratcentimeter an der Grenze der Atmosphäre jährlich von der Sonne zugestrahlt erhält und die er auch wieder abgibt. — Die Wärmeabgabe aus der Erde spielt also, wie von den Klimatologen längst erkannt, in der allgemeinen Strahlungsbilanz so gut wie keine Rolle. Man könnte einwenden, daß sich dieser Effekt durch Summierung in langen Zeiten doch bemerkbar machen müsse. Aber auch dann kann die Wirkung morphologisch nur unbedeutend sein. RUDZKI¹, (S. 215), berechnet aus dem Wärmeleitungsvermögen und dem Ausdehnungskoeffizienten der Gesteine die jährliche Verkürzung des Erdradius auf 0,04 mm (TRA-BERT gibt noch niedrigere Werte an); mit dem genannten Betrag kommen wir für 50 Millionen Jahre, die ich nach dem Beispiel des Tertiärs für eine Orogenperiode ansetze, auf eine *Erdradiussschrumpfung* von 2000 m. Aber diese Verkürzung hat für den *Erdumfang* nur eine Verkürzung um $(2\pi \cdot 2000) \text{ m} = 12600 \text{ m}$ zur Folge. Dieser Betrag, der sich auf den ganzen Erdumfang verteilt, kann wohl zahllose kleine Runzeln hervorrufen, niemals aber Faltungen im Ausmaße der großen Kettengebirge (bei den Alpen allein Zusammenschub um mehrere 100 km!). Es ist klar, daß auf solche Weise keine erheblichen *Höhenunterschiede* entstehen können. Die *Allgemeinkontraktion* ist also eine notwendige, aber *morphologisch und klimatisch fast unwirksame Kraft*. Dies stimmt mit den Erfahrungen der historischen Geologie durchaus überein. Wir müssen die Tatsache ins Auge fassen, daß das geologische Geschehen seit Bildung der festen Kruste *keine einseitige Entwicklung* aufweist. Schon im Algonkium haben wir Meere und Festländer, wir haben dort Spuren von Vereisungen wie in der jüngsten Vergangenheit, und schon im Kambrium treffen wir auf ein ausgedehntes tierisches Leben, also auf Zustände, die sich von den jüngeren Epochen nicht grundsätzlich abzeichnen, nur eben, wie diese, große *Schwankungen* aufzeigen. Sicher ist eine Abkühlung und Schrumpfung der Erdrinde in den letzten zwei Milliarden Jahren erfolgt; aber der Effekt war im Vergleich zu anderen Einflüssen, vor allem der jährlichen Zufuhr und Abfuhr von Sonnenenergie, von der Bruchteile jahrhunderttausendlang gespeichert werden können, nur ganz unbedeutend.

Wir wollen nun zu ermitteln suchen, *welcher Teil der Sonnenwärme* dazu verwendet wird, um auf der Erde morphologische Änderungen hervorzurufen. Als Mitteltemperatur der Erdoberfläche werden 14,4° angegeben. Andererseits ergibt eine Berechnung für die Meeresoberflächen allein, daß ihre Temperatur volle 3° höher steht als die der Landflächen (RUDZKI¹, S. 283). Auf dem Lande, wo der Untergrund unbeweglich ist, kann

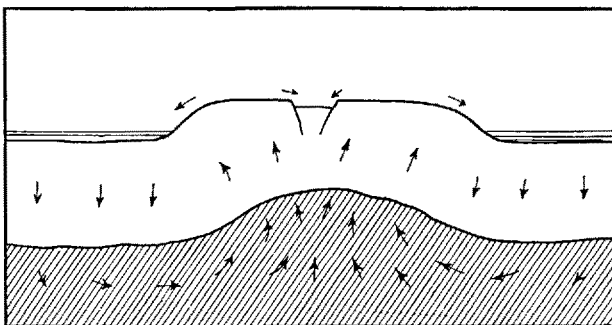


Abb. 10. Aufwölbung und Grabentektonik bei Kontinenten.

¹ O. JESSEN, Die Randschwellen der Kontinente, Erg.-Heft 241 zu *Petern. Mitt.* (1943).

¹ P. RUDZKI, *Physik der Erde* (1911).

ein erheblicher Wärmeaustausch mit anderen Teilen der Erdoberfläche nur über die Atmosphäre stattfinden. Anders auf dem Meere! Hier erlaubt die Beweglichkeit der Teilchen einen Austausch größten Stils sowohl mit den Polargegenden als mit der Tiefsee: die kalten Wassermassen können abtransportiert werden und ihren Kühlprozeß an anderer Stelle ausüben. Dies ist mit der Grund, warum die Oberflächentemperatur des Meeres höher steht als die des Festlandes. Aber wie stark ist bei der *Verlegung der Abkühlung* der Meeresboden *quantitativ* beteiligt? Darüber sollen uns einige einfache Überlegungen Aufschluß geben.

TRABERT¹ hat für die Kontraktion den Erdsektor betrachtet, der als Basis einen Teil der Erdoberfläche und als Spitze den Erdmittelpunkt hat. Er führt dabei die Rechnung so durch, als ob die Abkühlung sich *bis zum Erdzentrum* hin erstrecke; dadurch hat er seine an und für sich berechnete Anschauung in Mißkredit gebracht (vgl. A. WEGENER², S. 38). In Wirklichkeit ist diese Annahme gar nicht notwendig, denn für die Schrumpfung des Erdmantels ist es gleichgültig, ob sich eine Schicht von 10 km Dicke um 10° oder eine solche von 100 km Dicke um 1° abkühlt. Die Temperaturdifferenz von etwa 150°, die sich am Tiefseeboden gegenüber dem Landuntergrund einstellen muß, wird mit dem Erreichen der fluidalen Phase, d.h. in etwa 60 km Tiefe, verschwinden. Aber selbst hierüber brauchen wir keine besonderen Annahmen zu machen; wir wollen nur schätzen, wieviel Kalorien notwendig sind, um die von der Geologie ermittelten Senkungen zu erzielen, und diese Zahl in Beziehung zum Jahresumsatz der Sonnenstrahlung setzen. Die Senkung (mm/Jahr) sei d , der kubische Ausdehnungskoeffizient der beteiligten Gesteinsschicht β , ihre spezifische Wärme w , ihre Dichte s , ihre Dicke a ; es finde jährlich eine durchschnittliche Temperaturerniedrigung um ϑ ° statt und die dazu erforderliche Kalorienzahl sei x , dann ist

$$x = a \cdot s \cdot w \cdot \vartheta \text{ und } d = a \cdot \beta \cdot \vartheta,$$

$$\text{woraus } x = \frac{s \cdot w \cdot d}{\beta}.$$

Die Schichtdicke a und die Temperaturerniedrigung ϑ fallen also heraus und sind für die Berechnung der notwendigen Kalorien ohne Einfluß! — Es handelt sich jetzt nur noch darum, für die Konstanten plausible Werte einzusetzen, wobei zu beachten ist, daß es sich bei der Bestimmung von x nur um eine *Größenordnung* handelt. Ich setze $s = 3$, $w = 0,2$, $\beta = 0,00002$. Schwieriger ist es, Werte für die spez. Senkung d des Meeresbodens zu erhalten. Die Mehrzahl der Koralleninseln im Pazifik senken sich (MARSHALL³, S. 32) und die Korallen wachsen an der Oberfläche nach; diese von DARWIN aufgestellte Theorie wurde neuerdings bei den

Atombombenversuchen am Bikini-Atoll bestätigt⁴. Aber über das *Tempo* des Sinkens werden keine Angaben gemacht. Besser steht es mit Daten über Senkungen aus früheren Erdperioden; wir können wenigstens ermitteln, was im *Gleichgewichtszustand* an Senkungen wirklich auftritt. Zu beachten ist, daß die Senkung des Meeresbodens keineswegs an die Tiefsee mit ihren Temperaturen um 0° gebunden ist, sie findet vielmehr genau so in der Flachsee statt. Überall ist die Temperatur an der Oberfläche höher als am Grunde; dies trifft in gewissem Umfang auch für Süßwasserbecken zu. Abb. 11, die dem großen Werk von SCHOTT²

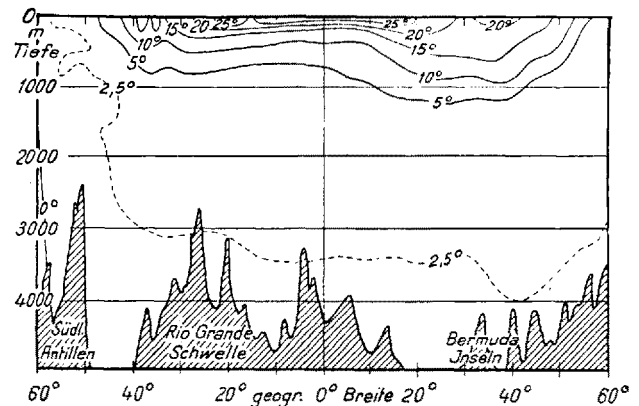


Abb. 11. Temperaturschnitt durch den Westatlantik (nach SCHOTT²).

entnommen ist, zeigt eindringlich, daß der Hauptabfall der Temperatur in den *obersten* Schichten stattfindet, daß also der Kühlprozeß schon hier kräftig wirkt; am Meeresgrund sucht sich, von Tiefenströmungen abgesehen, jeweils die Wintertemperatur der betreffenden Gegend einzustellen. Auf diese Art lernen wir verstehen, daß die Kontinentaltafeln so scharf zur Tiefsee *abbiegen*.

Zuverlässige Angaben über durchschnittliche Senkungen in größeren Zeiträumen erhalten wir, wie schon gesagt, aus den älteren Sedimenten, z.B. des Ruhrgebiets. Nach KAYSER-BRINKMANN³ (S. 129) kommt man dort zum Ergebnis, daß der Boden der devonischen Geosynklinale 0,1 mm, der obere Karbontrog um 0,25 mm im Jahr absank und im gleichen Tempo durch Sedimente aufgefüllt wurde. Bei den hier aufgeführten Senkungen dürfte es sich, da sie aus *Geosynklingen* entnommen sind, um Werte handeln, die *über* dem Mittel stehen. Wir gehen deshalb an die *untere* Grenze heran und nehmen als Richtwert $d = 0,1$ mm/Jahr. Auf diesen Wert kommt auch ZEUNER⁴ bei seinen Untersuchungen über die Ursachen der Eiszeit. Damit erhalten wir für den Jahresbetrag an Kalorien, der einem Quadratcentimeter Meeresuntergrund durch das Kühlwasser entzogen wird:

¹ «Neue Auslese», 2. Jahrgang (Alliierter Informationsdienst Baden-Baden); dort zitiert aus der Wochenschrift Time, Chicago.

² G. SCHOTT, Geographie des Atlantischen Ozeans (1944).

³ E. KAYSER-BRINKMANN, Abriß der Geologie, 1. Bd. (1940).

⁴ M. SCHWARZBACH (Ref. über F. E. ZEUNER) in Geol. Rundschau 35, 94 (1948).

¹ E. TRABERT, Lehrbuch der kosmischen Physik (Berlin 1911).

² A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane 5. Aufl., (Braunschweig 1936).

³ P. MARSHALL, Oceania, Handbuch der regionalen Geologie 6, 2 (1911).

$$\alpha = 300 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{Jahr.}$$

Der für Berechnung von α zugrunde gelegte Wert $d = 0,1$ mm, die Dicke einer Rasierklinge, mag gefühlsmäßig viel zu klein erscheinen. Aber wir müssen den *Zeitfaktor* in Betracht ziehen: 50 Millionen Jahre, als Maß für eine Orogenperiode, ergeben 5000 m *einseitige*, d. h. nur auf das Meer beschränkte Senkung, also einen zur Gebirgsbildung weitaus hinreichenden Betrag. Ganz wesentlich ist bei der neuen Betrachtung, daß durch das Kühlwasser beim Meer eine *abwärts* gerichtete, beim Land eine *aufwärts* gerichtete Bewegung eingeleitet wird und dadurch *morphologisch* wirksam wird, während bei der *Allgemeinkontraktion* Meer und Land gleichmäßig schrumpfen, also nur Differenzen in der Kontraktion auch beim Relief sichtbar werden. Würde die Denudation, die jenem *Schaukelspiel* zwischen Ozean und Kontinent entgegenwirkt, wegfallen, dann würde in einer Orogenperiode durch Massenaustausch benachbarter Gebiete sogar ein Höhenunterschied von zweimal 5000 m = 10000 m entstehen.

Stellen wir noch einige Vergleiche über die Kalorienzahlen an, die bei diesen Vorgängen in Betracht kommen! Ein Quadratcentimeter an der Grenze der Atmosphäre erhält jährlich im Durchschnitt 255000 cal; an die Erdoberfläche gelangen davon bei einem Transmissionskoeffizienten von 44% etwa 112000 cal, denen eine ebenso große Zahl von *ausgestrahlten* Kalorien gegenübersteht. Auch auf dem Meer für sich werden im Gleichgewichtszustand annähernd soviel Kalorien abgegeben, als zugeführt werden (der höheren Temperatur entsprechend etwas *über* 112000); aber der Abkühlungsprozeß vollzieht sich nur teilweise an der Oberfläche, zum andern Teil in tiefer liegenden Schichten. Das *Wärmeleitungsvermögen* trägt hierzu nur sehr wenig bei, wohl aber die *Konvektionsströmungen*, die das kalte Wasser von der Oberfläche wegführen. Nach DEFANT (entnommen aus KALLE¹, S. 19) beträgt der abwärts gerichtete Wärmestrom aus Wärmeleitung nur 44 cal/cm² pro Jahr, dagegen der durch Konvektion bedingte 18000 bis 36000 cal/cm² pro Jahr; er mag also rund ein Viertel des *Oberflächensatzes* umfassen. Die Wasserkühlung *könnte* also — und *wird* im Einzelfall — viel größere Senkungen hervorrufen, als dem Richtwert entspricht. Die davon abgezweigte Menge von 300 cal für Bodenkühlung ist davon nur ein kleiner Teil, aber immerhin noch das Fünffache des Abstroms an Erdwärme, der aus der geothermischen Tiefenstufe geschlossen wird. Viel wichtiger aber ist die *differenzierte* Wirkung der Kühlung auf Meer und Land! — Die Größenordnung der Meerbodensenkung muß sich auch in der durchschnittlichen Landhebung wiederfinden. Stellt man die Gesamtheit des Meeres der Gesamtheit des Festlandes gegenüber, dann muß man allerdings der verschiedenen Flächen wegen vom Land mehr als das Doppelte an Hebung erwarten. Da die Änderung der

Dichte bei dem Massentransport nur gering ist, muß auch der Rauminhalt ungefähr gleichbleiben. Aber es handelt sich ja nur um Größenordnungen, und zeitlich betrachtet sind die Gegenspieler *benachbarte Räume* von Meer und Land, die einander kompensieren, so daß die *individuelle* Betrachtung an erster Stelle steht. Ferner setzt mit der Hebung des Landes immer zugleich die *Denudation* ein, die, *auf lange Sicht betrachtet*, mit der Hebung gleichen Schritt halten muß. Die *Abtragung des Landes* ist also zugleich ein Maß für dessen *Hebung*. Wir lernten schon im Ruhrgebiet als Betrag für die Senkung und gleichzeitige Sedimentation während des Devons den Wert 0,1 mm im Jahr kennen. Als Werte für *rezente* Abtragung seien hier angeführt: die Hochgebirgsflüsse der Alpen mit *Maximalwerten* bis 0,5 mm/Jahr und als Beispiel für *Minimalwerte* die russischen Flüsse, die aus ihren weiten Ebenen nur 0,01 mm/Jahr herausführen¹. Einen Mittelwert zu bilden, dürfte sehr schwer sein, da sich der Betrag der Denudation nicht bloß örtlich, sondern auch zeitlich stark ändert. Aber es genügt, hier festzustellen: Die Werte für die Abtragung harmonisieren in der Größenordnung mit denen, die für die Senkung des Meeresgrundes gefunden wurden; der von PENCK für die Denudation angenommene Wert von 0,1 mm/Jahr dürfte als *Richtwert für alle Vorgänge dieser Art* anzunehmen sein.

Auch in dem *dynamischen Gleichgewicht*, das ich für die Erdkruste an Stelle des statischen Gleichgewichts setze, treten dauernd Schwankungen ein. In den Schelfen findet eine Sedimentation statt, die ein Mehrfaches der Ablagerung in der Tiefsee ausmacht; diesem Vorgang haben die Schelfe teilweise ihre Entstehung zu verdanken. Über die geringe Sedimentation in der Tiefsee finden wir Angaben bei SCHOTT² für den Atlantik. Danach hat sich dort seit der letzten Eiszeit jährlich 0,018 mm Blauschlick, 0,012 mm Globigerinenschlamm und 0,005 mm roter Ton abgesetzt; die beiden letzten Sedimente umfassen je rund ein Drittel des Tiefseearcals. Die Ablagerung vermag also hier die Senkung bei weitem nicht auszugleichen. — Aber auch die Senkung kann sich nicht ins Endlose fortsetzen. Denn für die geschrumpfte Bodenschicht bleibt das Gewicht erhalten und das Gewicht der auflagernden Wassersäule vergrößert sich, aber nur so lange, bis der vergrößerte Druck hinreicht, die darunterliegenden zähflüssigen Massen zur Seite zu schieben und an weniger belasteten Stellen in die Höhe zu drücken. Der Eintiefungsvorgang ist mit einem Stempel zu vergleichen, der in einen Kübel mit Teig eintaucht: der Teig steigt nach Maßgabe des ausgeübten Drucks um den Stempel herum empor! — Diese Überlegungen lassen sich auch auf die isostatischen Bewegungen übertragen, die als Folge der diluvialen Eisbedeckung in Skandinavien und in Nordamerika festgestellt wurden. Als Beispiel für ihren

¹ K. KALLE, Der Stoffhaushalt des Meeres (1943).

² E. KAYSER-BRINKMANN, Abriß der Geologie, 1. Bd. (1940).

³ G. SCHOTT, Geographie des atlantischen Ozeans (1944).

Betrag führe ich an, daß sich das Land bei Stockholm jährlich um 4,5 mm hebt — also um eine *höhere* Größenordnung, als wir bisher bei den Hebungen und Senkungen fanden. Dies entspricht aber dem viel rascheren Entstehen und Vergehen einer Inlandeisdecke; denn diese verhält sich zur normalen Bildung einer Sedimentdecke etwa wie die Wasserführung eines Flusses zu seinen Schwebstoffen. Bemerkenswert ist aber die Intensität, mit der die Erdkruste auf diese Belastung reagiert; dies ist ein handgreiflicher Beweis dafür, daß sich die Erdrinde von gewisser Tiefe ab nicht wie ein starrer, sondern wie ein *zähflüssiger* Körper verhält. Auch weitere Eigenschaften, z.B. die Aufpressung der Randgebiete durch die Inlandmassen (nach SOERGEL) würden sich in das allgemeine Bild gut einpassen.

Kehren wir von den relativ kurzfristigen Vorgängen der Erdgeschichte zu den langfristigen zurück! Um sie richtig zu verstehen, müssen wir uns klarmachen, daß es sich nicht um ein Gleichgewicht handelt, das man mit den Gesetzen der Isostasie streng nachprüfen könnte. Wohl ist Isostasie in groben Zügen vorhanden, aber der Nachdruck *bei der Entwicklung* liegt darauf, daß sie durch die differenzierte Abkühlung von Meer und Land dauernd *gestört* wird, ohne daß es gelingen kann, ein *Dauergleichgewicht in der Lage* herzustellen. Wie bei den Zyklonen und Antizyklonen der Atmosphäre, entsteht eine ständige Strömung von den Orten des Überflusses zu denen des Abmangels, und dieser Kreisprozeß kann niemals aufhören, wenn nicht die erregenden *Ursachen* beseitigt werden — und diese liegen *in dem Gegensatz Meer—Land*. Beim Abkühlungsprozeß vertieft sich das Meer und erhöht mittelbar das Land, arbeitet also im Sinne einer *Verschärfung* der Gegensätze statt an ihrer Milderung, aber eben nur so lange, bis ihr die *entgegenwirkende Schwere*, die der *Isostasie* zustrebt, Einhalt gebietet. Dies ist der Vorgang, wenn wir ihn von der Seite der Mechanik betrachten; er führt, im Mittel gesehen, zu einem Kreisprozeß mit *stationärer Strömung*. Aber bei unserem Kreisprozeß gewinnt bald dieses, bald jenes Glied einen gewissen Vorsprung: in den ruhigen, länger dauernden Perioden sinkt das Meer ein; der Druck auf die fluidale Unterlage steigt, hat aber noch keine erheblichen Horizontal- und Aufwärtsbewegungen der Umgebung zur Folge. Diese erfolgen erst nach Speicherung der elastischen Kraft und erfolgen in plötzlicher Art, durch Ausbruch des Magmas und rasche Hebung in den Orogenen; aber auch die Hebung wird durch raschere Abtragung wieder ausgeglichen und leitet dadurch zum früheren Zustand zurück.

Die *Wärmemaschine*, die den Meeresboden zugunsten des aufsteigenden Landes sinken läßt, braucht als Ursache nur die Ausstrahlung der Meeresoberfläche, deren Wirkung teilweise auf den Meeresboden verlegt wird; sie verzichtet auf Radioaktivität und kosmische Kräfte, auch auf allseitige Kontraktion als Ursache der Gebirgsbildung, weil sie mit einfacheren Mitteln auskommt.

Wir wollen nun die Wirkungsweise unserer thermodynamischen Maschine im einzelnen näher ins Auge fassen! Nach der allgemeinen Annahme, die sich auf die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen, auf gravimetrische Beobachtungen und auf allgemeine physikalische Überlegungen stützt, stellen die Kontinente leichtere Schollen (Sialmassen) dar, die im Schwimmgleichgewicht in ein schweres Medium (Simamassen) eintauchen; ferner muß die Dichte allgemein mit der Tiefe zunehmen. Für die tieferen Schichten muß man eine gewisse Fließfähigkeit annehmen; es müssen also die *elastischen Eigenschaften* des Erdinnern erörtert werden. Es ist hier zu unterscheiden zwischen der *Inkompressibilität* (Widerstand gegen Zusammendrückung), der *Righeit* (Torsionsmodul, Widerstand gegen Verformung) und der *Viskosität* (innere Reibung, Widerstand gegen das Fließen). Sowohl die Inkompressibilität als die Righeit müssen mit dem nach unten rasch wachsenden Druck *zunehmen*. Aber beide Größen messen nur die Eigenschaften, die sich bei Verringerung des Drucks wieder *zurückbilden*, d.h. die elastischen Eigenschaften im engeren Sinne. Für die Bemessung der Fließfähigkeit ist die dritte Größe, die Viskosität, maßgebend. Leider haben wir bis jetzt nur wenig Anhaltspunkte für die Größe der Viskosität im Erdinnern und sind auch nicht in der Lage, die dort herrschenden hohen Drucke im Laboratorium nachzuahmen. Sicher ist aber, daß die *Viskosität* mit dem Druck zwar zunimmt, *mit der Annäherung an den Schmelzpunkt* der Gesteine aber *abnimmt*, so daß in gewisser Tiefe trotz der ungeheuren Drucke ein zähflüssiger Zustand erreicht wird. Ferner ist gewiß, daß auch feste Körper imstande sind, länger auf sie einwirkende Kräfte in sich aufzuspeichern und dadurch Fließfähigkeit zu erreichen. Ein mit Pech gefüllter Eimer, dessen Inhalt man wie Glas zerhacken kann, fängt beim Umlegen nach einiger Zeit an auszufließen; eine an den Enden aufgelegte Siegellackstange biegt sich im Laufe der Zeit durch (A. WEGENER und K. WEGENER¹). In welcher Tiefe findet nun der

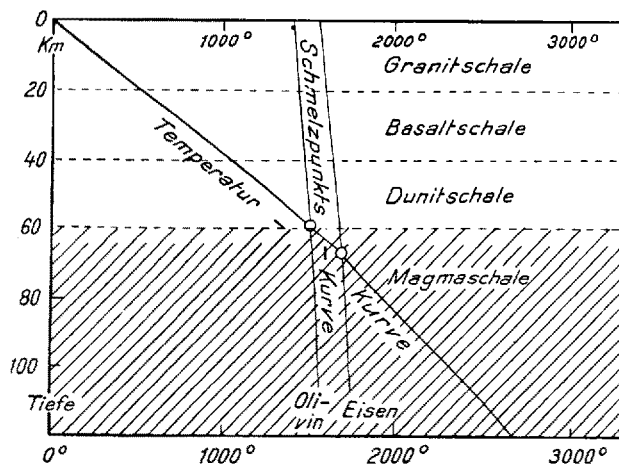


Abb 12. Zustand der Erdrinde. Skizze nach F. VON WOLFF².

¹ K. WEGENER, Die Physik der Erde (Braunschweig 1934).

² l. c. p. 248, Fußn. 1.

Übergang in den zähflüssigen Zustand statt? F. von WOLFF¹ hat die Zunahme der Temperatur und die Erhöhung des Schmelzpunkts mit zunehmendem Druck in einer graphischen Darstellung vereinigt (Abb. 12). Da der Schmelzpunkt langsamer mit der Tiefe wächst als die Temperatur, wird er von dieser eingeholt — die schon erwähnte Tiefe von 60 km ist diejenige, in der auch schwer schmelzbare Gesteine trotz der hohen Drucke in den fluidalen Zustand eintreten; dabei ist der Übergang ganz allmählich, wohl schon von 40 km Tiefe ab, zu denken. — Auf einen etwaigen weiteren Übergang in den gasförmigen Zustand braucht hier nicht eingegangen zu werden, ebensowenig auf die Natur des inneren Erdkerns, weil diese Fragen für die Bildung der äußeren Erdkruste nur von geringer Bedeutung sind. Es sei nur bemerkt, daß oberhalb des kritischen Drucks und der kritischen Temperatur, die beispielsweise für Wasser bei 196 Atmosphären bzw. 370° liegen, ein grundsätzlicher Unterschied in den elastischen Eigenschaften gar nicht mehr festzustellen ist (TAMMANN nach TRABERT², S. 557).

Von mancher Seite wird die Energiequelle für die Bildung der Erde einfach in der *stofflichen* Differenzierung gesucht, die beim Erkalten der Erde eintritt. Daß in der homogenen Masse, die wir im Erdinnern voraussetzen, beim Erkalten eine Spaltung eintritt, wird von keiner Seite bezweifelt. Die Sialmassen werden im wesentlichen mit den Graniten, die Simamassen mit den Basalten gleichgesetzt und man nimmt an, daß beide in gewisser Tiefe von olivinreichen Gesteinen (Dunit, Peridotit) mit höherer Dichte abgelöst werden. Die Umwandlung der oberen Schichten von den unteren her wird als Migmatisierung (eine Art Durchschwitzung und teilweise Injektion von Magma) beschrieben. Man könnte fragen, ob nicht auch durch diese chemischen Umwandlungen Wärmemengen frei werden, die die Gebirgsbildung hervorrufen. Aber die Erdgeschichte gibt uns dafür kaum irgendwelche Anhaltspunkte. Wir haben keinen Grund zur Annahme, daß sich in der Erdkruste, nachdem sie einmal gebildet war, in *energetischer* Beziehung viel geändert hat. Auch hier ist, wie beim Klima und den allgemeinen Lebensbedingungen, die wahrscheinlichste Annahme, daß die einseitigen Änderungen gegenüber heftigen, kurzfristigen Schwankungen nur gering sind. Wohl haben bei gewissen Gesteinen, so bei Kohle und Erdöl, gewisse Speicherungen stattgefunden, die jetzt abgebaut werden können; aber die dort zu gewinnenden Energiemengen sind nur ein geringer Bruchteil eines Jahresumsatzes (WUNDT³). Wenn die Erde wirklich imstande wäre, aus ihrem Inneren erhebliche Energie abzugeben, müßte sich dies in einem örtlich oder zeitweilig gesteigerten Wärme- fluß aus der Tiefe zeigen. Steigerungen der Vulkan-

tätigkeit, Verringerung der geothermischen Tiefenstufe gehören nach allen Erfahrungen nicht zu den Lieferanten *erdweiten* Energiezuschusses, und auch die Orogene verteilen sich auf viele Millionen Jahre, so daß man in ihnen zwar eine Steigerung, aber nicht einen völligen Umsturz im Energieumsatz zu vermuten hat. Wir werden deshalb in dem jetzigen Verhalten der Erdkruste eine genügende Grundlage sehen dürfen, um auch ihr Verhalten in der Vergangenheit einigermaßen beurteilen zu können.

Um über die *Lokalisierung des Materialkreislaufes* zwischen Tiefseeböden und Festland ein Bild zu gewinnen, müssen wir über die Dichte der Sialschollen, der Simamassen und die sie unterlagernde zähflüssige Zone plausible Annahmen machen, die vor allem mit den Beobachtungen über die Erdbebenwellen, aber auch mit den gravimetrischen Beobachtungen und den Daten über die Temperaturverhältnisse im Einklang stehen. Mit MILANKOVITCH¹ setze ich für die Kontinentalschollen den Wert 2,8, für die Schichten unter den Meeren 3,0 und für die fluidale Unterschicht 3,4. Bei diesen Annahmen liegt die isostatische Ausgleichfläche in 75 km Tiefe. Die fluidale Zone liegt also — im Gegensatz zu den Voraussetzungen anderer — unter den Kontinenten *näher* an der Oberfläche als unter den Meeren. So fordern es die von MILANKOVITCH berechneten Bewegungen, so will es auch die Temperaturzunahme gegen das Erdinnere, die nur unter dem Festland ungestört ist. MILANKOVITCH nimmt an, daß die Festlandsblöcke etwa 15 km weniger tief in den flüssigen Kern eintauchen als der feste Meeresboden (nur 60 km gegenüber 75 km). In dieser Tiefe muß der wirksame Druck des kühleren Meeresbodens gegen die oberste Schicht des fluidalen Kerns besonders groß sein (Abb. 9 und 10). Die zähflüssigen Massen unter den Kontinenten werden wie in einem Schraubstock zusammengepreßt. Naturgemäß wirkt sich dieser Druck an der Grenze Meer—Land am stärksten aus, wobei infolge der geringen Elastizität der Oberschicht Spalten, Gräben und Brüche entstehen. Die Brüche und Verwerfungen äußern sich in der *Erdbebenhäufigkeit*, die Füllung der Spalten mit aufgepreßtem Magma in der gesteigerten *Vulkantätigkeit* der Küsten. Da diese Kräfte dauernd am Werk sind, werden sich Gleichgewichtszustände verschiedener Art einstellen. Ist der Druck von unten nicht sehr stark, dann ist auch die Aufwölbung nur gering, die Denudation kann nachkommen (Epirogenese). Erhöht sich der Druck von unten, dann werden die oberen Schichten von den nachdrängenden glutflüssigen Massen aufgeschmolzen und es bilden sich Plutone, in denen tiefliegendes Material bis an die Oberfläche gefördert wird. Infolge des Nachhinkens der Abtragung wachsen die Gebirge, die Sedimentdecken werden schief gestellt und schließlich zur Faltung gebracht, während kristallines Gestein, durch Migmatisierung

¹ F. von WOLFF, Stoff und Zustand im Innern der Erde, Nova acta Leopoldina (1943).

² E. TRABERT, Lehrbuch der kosmischen Physik (Berlin 1911).

³ W. WUNDT, Meteor. Z. 325 (1939).

¹ M. MILANKOVITCH, Kanon der Erdbestrahlung (Belgrad 1941).

und Umschmelzung entstanden, den Kern und die höchsten Teile des Gebirges erfüllt (Orogenese). Aber auch diese Gebirge werden abgetragen und bilden in späteren Orogenen die verfestigten Nähte größerer Flächen, die von der Gebirgsbildung nur wenig berührt wurden. Auf diese Art bilden sich weite Areale mit stärkerem Zusammenhalt, die einer Neufaltung einen gewissen Widerstand entgegensetzen, die sog. *Kratone*. Ein solches Kraton (Beispiel Südafrika) kann aber durch zangenartige Pressung von beiden Seiten gehoben und nach oben gewölbt werden, wodurch in der Mitte Dehnungen und Grabenbrüche entstehen¹. In andern Fällen (Beispiel Südostasien) finden am Rand großer Kratone immer neue Anfaltungen statt, wobei die entstehenden Falten zunächst als Inselgirlanden auftreten. Charakteristisch für solche Gegenden sind tiefe Gräben und dahinter breite Schelfe, da starker Faltungstätigkeit auch starke Abtragung entspricht. Der Schelf ist ganz allgemein als Produkt der Abtragung im Widerspiel zur Auffaltung anzusehen, wobei aber seine Bildung in sehr alte Zeiten zurückgehen kann: Er ist eine aus dem Materialkreislauf sich ergebende Notwendigkeit, die Antwort der Denudation auf die randliche Hebung der Kontinente.

Der primäre Vorgang ist aber immer die Eintiefung der Meere. CLOOS¹ und SONDER² verdanken wir die Beobachtung, daß diese Eintiefung *feldartig* erfolgt, indem sie die Erdkugel in ein vielgestaltiges Polyeder aufzulösen versucht. Am Rande solcher Felder kann eine Abbiegung der Kontinentalränder erfolgen, die sich z. B. in den merkwürdigen untermeerischen Flußrinnen des Kongo, Hudson usw. kundgibt. Aber bei der Größe der Felder findet sich eine auffallende Differenzierung, auf die WÜST¹ beim Vergleich der Ozeane aufmerksam gemacht hat: «Die einheitliche Gleichförmigkeit der Böden macht es wahrscheinlich, daß die pazifische Zentralmulde wesentlich ‚durchgängiger‘ ist und nicht in zahlreiche Polygonalfelder zerlegt wird. Die Bodentemperatur variiert in der pazifischen Tiefsee zwischen 50° S und 50° N von 0,6°C bis 1,2°C, also um 0,7°C, während allein im Boden des begrenzten brasilianischen Beckens Temperaturdifferenzen von 1,6°C auftreten.» Der Zusammenhang des Meerbodenreliefs mit den Tiefseetemperaturen tritt also klar zutage! — Zur Frage der *Permanenz* der Ozeane ist zu sagen: Man kann wohl gewissen Teilen der Erde, z. B. dem Pazifik, eine gewisse Permanenz zuerkennen, nicht aber den Mittelmeeren, vielleicht nicht einmal dem Atlantik und dem Indik. Dieselben Kräfte, die am Rand des Pazifischen Ozeans die Kette der Anden auftürmten, können auch alte Kontinente an ihren Schwächezonen (Geosynklinalen) aufspalten, indem der unterirdische

Druck die Festlandsteile allmählich voneinander entfernt — so beim Gondwanaland! Die Drift WEGENERS erscheint demnach als Folge allmählicher Eintiefungen von Meeresarmen. Dabei kommt auch die Dehnungstheorie von GUTENBERG¹ zu ihrem Recht, indem bei den auseinanderdriftenden Kontinenten die Ober-schicht ausgedünnt und teilweise durch schweres Magma ersetzt wird. Auf diese Art erklären sich gewisse Eigenschaften des Atlantik, der in seinem Verhalten zur Schwere und den Erdbebenwellen eine Zwischenstellung zwischen Festland und Pazifik einnimmt. — Umgekehrt kann aber auch, wenn diese Bewegung eine Grenzlage erreicht, wie das heute in Südamerika der Fall zu sein scheint, ein rückläufiger Druck eintreten und sich an der alten Geosynklinale der mittelatlantischen Schwelle auswirken. Diese ist, wie aus Erdbebenbeobachtungen zu schließen, das Objekt eines erneuten Aufbaus, während die Küsten des Südatlantik von Erdbebenerscheinungen verhältnismäßig frei sind.

Aber vielleicht sind diese Spekulationen schon zu weit gegriffen. Sie sollen nur die Möglichkeiten aufzeigen, die sich durch Anwendung der Kühlbodenhypothese auf das Relief der Erde auf-tun. Selbstverständlich werden andere, früher schon besprochene Kräfte in keiner Weise in Abrede gestellt. Wir wollen einige dieser Kräfte aufzählen, ohne daß wir über das Verhältnis ihrer Wirksamkeit bis jetzt viel aussagen können. Die Auffaltung der großen Kettengebirge von den Alpen bis zum Himalaya dürfte als Hauptursache eine Unterströmung von seiten des mesozoischen Mittelmeers, der *Tethys* haben; aber auch die *Polfluchtkraft* war beteiligt, indem sie bei diesen Gebirgen ihren Steilabfall nach Süden begünstigte. — Die *Westdrift* der Kontinente, eine Folge der Gezeitenreibung, mag dazu beigetragen haben, die Anden aufzustauen, während sich der Kreislauf an der Westküste des Pazifik infolge geringeren Widerstands in einzelne Ketten und Girlanden auflöste. — In keinem Fall darf außer acht gelassen werden, daß wir ungeheuer lange Entwicklungen hinter uns haben, und daß ähnliche Vorgänge, wie sie sich im jüngsten Orogen abgespielt haben, auch schon Hunderte von Jahrmillionen vorher, teilweise an den gleichen Stellen, stattgefunden haben. Schon in den ältesten Teilen der jetzigen Erdkruste müssen wir Umbildungen, Aufschmelzungen von Sedimenten vermuten. RITTMANN¹ sagt: «Die erste Sialscholle entstand aus den Ursedimenten durch Granitisierung; zur Erhaltung der Isostasie stieg sie empor und wurde zur Keimscholle der Kontinente.» Die Geosynklinalen, die wir mit ursprünglichen Schwächezonen der Erdrinde gleichsetzten, können daher jetzt sowohl von Meeren als von Gebirgen im Sinne von Nahtstellen der Felderstruktur eingenommen werden. Ihr Charakteristikum ist also nicht hohe oder tiefe Lage, sondern ihre Disposition zur Veränderlichkeit bei relativer Konstanz der geographischen Lage. Sie sind die Geburtsstätten der

¹ H. CLOOS, Gespräch mit der Erde (1947).

² Geologische Rundschau 30 (1939) mit dem Atlantisheft und dem Zwischenheft (4a) von CLOOS. Enthält zahlreiche Beiträge zu diesen Fragen, von denen zitiert sind: BUCHER, S. 285; CLOOS, S. 401, 637; JUSTI über KIRSCH, S. 790; RITTMANN, S. 52; SONDER, S. 28; S. WÜST, 132.

¹ H. CLOOS, Gespräch mit der Erde (1947).

Orogene, während die Felder den Baustoff zur *Epirogenese* liefern. Als permanent sind also außer den weiten Flächen des Pazifik einige alte *Kratone* (Kanada, Nordeuropa, Sibirien, Südafrika usw.) anzusehen in dem Sinne, daß sie als Ganzes geschlossen beieinander blieben, ohne aber dadurch gelegentlichen Überflutungen durch das Meer zu entgehen.

Zu beachten ist bei der hier entwickelten *Kühlbodenhypothese*: Wenn man der Theorie der Kontinentenverschiebung und der Isostasie vorwirft, sie gehe von einem bestimmten Anfangszustand aus und lasse die Entwicklung dort erst beginnen, oder sie bringe zwangsläufig die Annäherung an einen Gleichgewichtszustand, so bleibt bei der neuen Hypothese der *Fluß der Erscheinungen* dauernd *aufrechterhalten*. Ungleichheiten an der Oberfläche beobachten wir fast bei allen Himmelskörpern — denken wir nur an die Sonnenflecken oder die Mondkrater — und solche müssen auch bei der ersten Bildung der festen Erdkruste vorhanden gewesen sein, selbst wenn wir von der PICKERINGSchen Hypothese der Mondablösung absehen. Wenn aber eine ungleiche Bedeckung mit Meer und Land einmal vorhanden war, dann wirkte die Ansammlung kalten Wassers am Grunde der Meere zu allen Zeiten dahin, daß die Tiefe des Meeres vergrößert und der Rand des Festlandes aufgewulstet wurde. Gleichzeitig aber schaffte die Denudation das emporgehobene Material ins Meer zurück und hielt den unterirdischen Druck auf die Küsten aufrecht. Dieses Spiel konnte und kann nie ein Ende finden, denn die Unstetigkeit Meer—Land und die physikalische Verschiedenheit des Wassers vom festen Gestein kann niemals einem Gleichgewichtszustand weichen, solange die jetzigen, aber schon Milliarden von Jahren vorhandenen Bedingungen weiterbestehen. Der Satz *natura non facit saltus* erleidet eben in der Physik und daher auch in der Geomechanik erhebliche Einschränkungen.

Durch die neue Hypothese wird auch auf das *rhythmische* Geschehen in der Erdgeschichte ein neues Licht geworfen. Das Absinken des kalten Wassers in die Tiefe erfolgt verhältnismäßig rasch, viel langsamer die Ausbreitung der kalten Temperaturwelle in den Untergrund. Wie lange es dauert, bis eine Bewegung in der fluidalen Zone dadurch ausgelöst wird, läßt sich schwer beurteilen, aber sicher ist, daß die Aufschmelzung, die mit dem Aufstieg des Magmas verbunden ist, zunächst eine große Aufspeicherung von Wärme erfordert, weil die Schmelzwärme aller Stoffe ihre spezifische Wärme vielfach übersteigt. Unter diesen Umständen muß sich eine Ansammlung von Wärme lange Zeit vorbereiten,

ehe der Ausbruch wirklich stattfindet. Die Gebirgshebung ist daher ein relativ plötzlicher Vorgang, dem die gleichzeitig einsetzende Denudation meist nicht voll nachkommen kann; es entstehen Hochgebirge und Täler mit unausgeglichenem Gefäll, Senken ohne Abfluß. Eine lange Zeit der Ruhe im Anschluß an die Orogene ist notwendig, um die entstandenen Höhenunterschiede wieder auszugleichen und den Meeresboden neu zu belasten. Das Mesozoikum mag ungefähr das Fünffache an Zeit umfassen, verglichen mit der Orogenperiode des Tertiärs. Die Erde wird noch weitere Orogene erleben, aber es werden wohl Hunderte von Millionen Jahre bis dahin verstreichen! — Daß *Eiszeiten* auf die Zeiten der Gebirgsbildung folgen, wollte man früher damit begründen, daß die Gebirge durch die Hebung befähigt wurden, größere Gletscher zu erzeugen. Diese etwas primitive Erklärung kann man jetzt durch eine andere ersetzen. Die *Orogenesen* sind zugleich Perioden der allgemeinen Hebung des Landes und des Auftauchens von Landbrücken; dadurch entsteht bei *Anhäufung von Festländern um die Pole* eine zunehmende Schwierigkeit für die warmen Äquatorialströmungen, in die Nähe der Pole zu gelangen; die *Warmwasserheizung der Polarregionen fängt an, zu versagen*. Dies war im Permokarbon durch Landanhäufung um den Südpol, im Diluvium durch ebensolche um den Nordpol der Fall. Infolgedessen konnten die astronomisch bedingten kühlen Sommer und der wachsende Reflexionseffekt ihre Wirksamkeit ausüben. Aber die Entwicklung einer Eiszeit ist nur eine Möglichkeit, nicht eine Notwendigkeit; so hat der Karbonnordpol, der im nördlichen Pazifik, also in Meerumgebung, lag, keinerlei Eisspuren hinterlassen.

Summary

In reviewing the theories of the formation of the earth, we miss a unifying force that keeps the mechanism in movement. Isostasy, contraction, radioactivity alone are not sufficient, in as much as additional "cosmic" forces must be called to help. In developing further the theory of the sub-surface streamings, we have gone into the effect of the oceanic cold floors. A part of the cooling process that maintains equilibrium with the solar radiation is displaced through the sinking of the cold water to the bottom of the sea. The cooled and therefore heavier bottom presses upon the adjacent fluid zone and produces a sub-surface streaming of the solid lands which are thus raised up, especially at their edges. The denudation of the solid land carries the thrown-up masses back again into the sea, and thus arises a compression of the outer shell that furthers the process already begun and maintains it in a circulatory form. — The rhythmical character of the earth's history can be explained from the interruptions that this circulatory process has suffered through physical discontinuities.