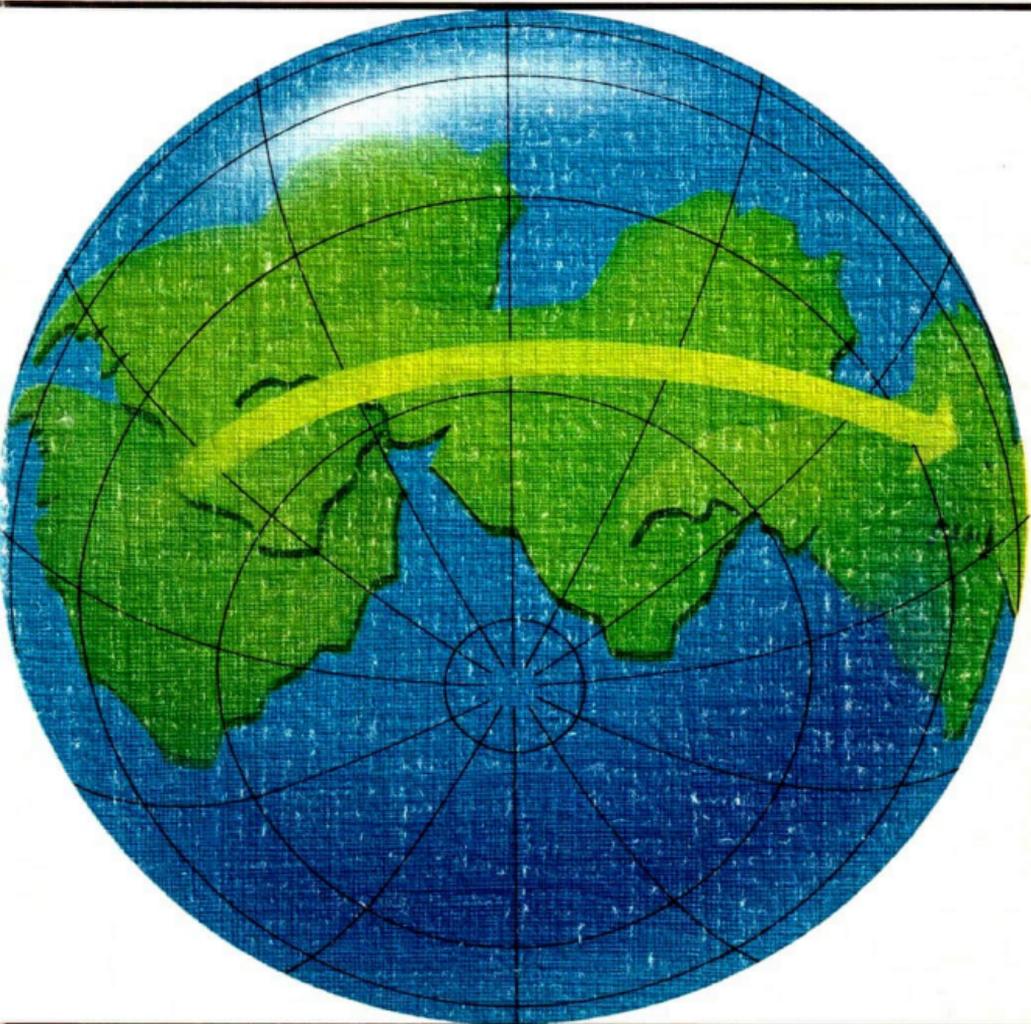


akzent

Rudolf Hohl

# Wandernde Kontinente



Als im Jahre 1912 Alfred Wegener zum erstenmal seine umwälzenden Gedanken von einer Verschiebung der Kontinente vortrug, stellten sich die damaligen Geowissenschaftler in fast geschlossener Front gegen diese »Waghalsigkeit«. Bemerkungen wie »Phantasiegebilde« sind bezeichnend für die Einstellung führender Geologen jener Zeit.

Heute ist das anders. Neuartige Forschungsmethoden, besonders der Seegeophysik, der experimentellen Petrologie, des Paläomagnetismus und anderer Disziplinen, wie der Mikropaläontologie, und nicht zuletzt rund 500 Bohrungen zwischen 1968 und 1973 in fast allen Ozeanen erbrachten Erkenntnisse, die zu einer neuen globalen Tektonik geführt haben und schließlich zu einer Erneuerung der Anschauung von der Kontinentalverschiebung. Es entstand ein faszinierendes Modell, das trotz einer Reihe strittiger Einzelheiten als Gesamtkonzeption wegen seiner Einfachheit und Klarheit akzeptiert wird.

Prof. Dr. Rudolf Hohl, ein Kenner der klassischen geotektonischen Auffassungen, hat sich umfassend in das neue Wissenschaftsfeld eingearbeitet, das er gleichermaßen sicher geologisch und geophysikalisch beherrscht. Aus dieser reifen Sicht vermag er die Leistungen der »Klassiker« sachlich zu analysieren und ihrem Schatz von Beobachtungen und Erkenntnissen den ihm gebührenden Platz in den neuen Hypothesen und Theorien zuzuweisen. Mit dem neuen geologischen Weltbild haben solche markante Erscheinungen wie »driftende Kontinente«, Erdbeben und Vulkane ihre Erklärung gefunden.



---

Rudolf Hohl

# Wandernde Kontinente

---

Urania -Verlag Leipzig · Jena · Berlin

Autor: Prof. em. Dr. Rudolf Hohl, Halle (Saale)

Illustrationen: Klaus Thieme

*1. Auflage 1985*

*1.-30. Tausend. Alle Rechte vorbehalten*

© Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

*Verlag für populärwissenschaftliche Literatur Leipzig, 1985*

*VLN 212-475/64/85 LSV 141 9*

*Lektor: Ewald Oetzel*

*Einbandreihenentwurf: Helmut Selle*

*Typografie: Julia Strube*

*Foto: NASA (2)*

*Printed in the German Democratic Republic*

*Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb*

*Leipzig, Betrieb der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/97*

*Best.-Nr.: 653 989 6*

*00\**

---

# *Inhalt*

---

## *Revolutionierende Ideen 7*

### *Ein Blick ins Erdinnere 12*

Wie kann man ins Erdinnere sehen? 12

Von der Kruste zu den tieferen Erdschalen 15

### *Bewegungen und Massenverlagerungen der Erdkruste 20*

Geotektonische Hypothesen 20

Zwei extreme Gedankengebäude 21

Kontraktion und Expansion 22

Der Motor in der Tiefe? 24

Wieder andere Deutungsversuche! 26

Kontinentalverschiebung – eine kühne Vorstellung 29

### *Von der Kontinentalverschiebung zur Plattentektonik 34*

Vom Bau der Kontinente 34

Vorstöß zu den Ozeanböden 38

Ein Gebirgsrücken mitten im Atlantik 41

Island, Insel im Atlantischen Rücken 45

Ausbreitung des Meeresbodens 47

Tiefe Brüche und Gräben im Antlitz der Kontinente 51

Geburt und Tod eines Ozeans 54

Versunkene Festlandsreste im Ozean? 63

Das neue Bild einer lebendigen Erde 64

Die Motoren der Bewegung 68

Dehnung und Subduktion – Erdbeben und Vulkane 72

Die Plattenränder 78  
Wärmebeulen und Tiefenbrüche 81

### *Das Alter der Ozeanböden 87*

Mysteriöse magnetische Streifen 87  
Wie alt sind die Ablagerungen? 90

### *Ein neues Erdbild? 92*

Driftbewegungen oder Polwanderungen? 92  
Gebirgsbildung in neuer Sicht 94  
Intraplattentektonik 97  
Ein Superkontinent zerfällt 98  
Plattenbewegungen in älteren Zeiten der  
Erdgeschichte? 105  
Plattenbewegungen und Gebirgsbildung heute 111  
Streit um wissenschaftliche Modelle 113  
Vorstoß in Neuland 118

### *Erdgeschichtliche Zeittafel (Formationstabelle) 126*

*Literaturhinweise 128*

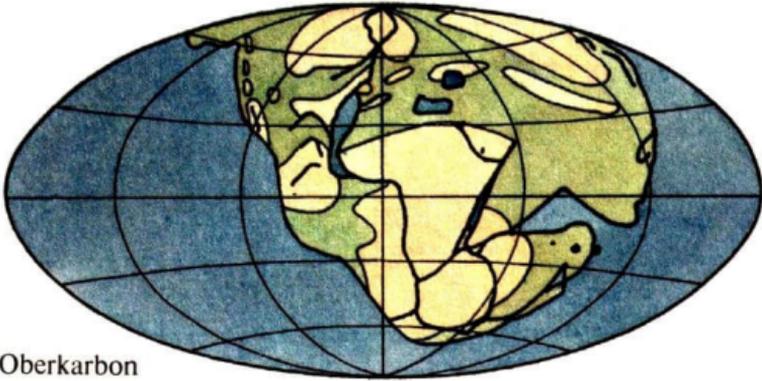
---

# Revolutionierende Ideen

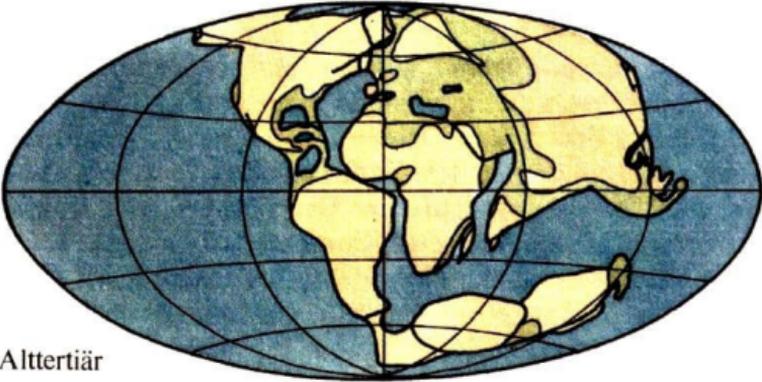
---

Am 6. Januar 1912 hielt der 31jährige Privatdozent für Astronomie und Meteorologie an der Universität Marburg, Dr. Alfred Wegener, auf der Jahresversammlung der »Geologischen Vereinigung« in Frankfurt (Main) einen Vortrag mit dem Thema »Neue Ideen über die Herausbildung der Großformen der Erdoberfläche (Kontinente und Ozeane) auf geophysikalischer Grundlage«. Hier trug er zum ersten Male seine revolutionierenden Gedanken von einer Verschiebung der Kontinente vor einem Kreis maßgeblicher Geologen vor. Wegen der »fortgeschrittenen Zeit« fand keine Diskussion des Vortrages statt. Seine Ausführungen erschienen noch im selben Jahr in der »Geologischen Rundschau« (Zeitschrift für Allgemeine Geologie) und in erweiterter Form unter dem Titel »Die Entstehung der Kontinente« in drei Teilen in »Petermanns Geographischen Mitteilungen«. Im Jahre 1915 kam im Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn in Braunschweig die 1. Auflage von Wegeners berühmtem Buch »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane« heraus, das, jeweils neu bearbeitet und ergänzt, bis 1929 vier Auflagen erlebte und in viele Sprachen übersetzt wurde.

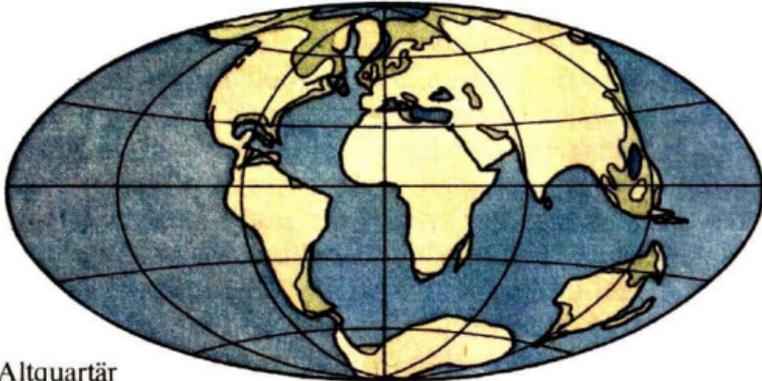
Wegeners Gedanken stießen bei den führenden Geologen auf Ablehnung – eine Ausnahme bildete der Heidelberger Professor Wilhelm Salomon-Calvi (1868–1941) –, zumal sie von einem »Außenseiter«, einem Geophysiker, vorgelegt wurden, auch wenn dessen geophysikalische Erwägungen durch geologische Erkenntnisse und Beobachtungen gestützt wurden. So darf man Wegener deshalb durchaus als Geowissenschaftler bezeichnen. Hat er doch selbst gesagt, daß man nur durch die Zusammenfassung



Oberkarbon



Alttertiär



Altquartär

*Wegeners Rekonstruktionen der Erdkarte für drei Zeiten nach einer Darstellung aus seinem Werk »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane«. Blau: Tiefsee; grün: Flachsee (heutige Konturen nur zum Erkennen)*

aller Geowissenschaften hoffen dürfe, die Wahrheit zu ermitteln.

»In fast geschlossener Front stellte sich die Geologie zunächst gegen diesen wagehalsigen Versuch« Wegeners, schrieb H. Cloos im Jahre 1936. Bemerkungen wie »Phantasiegebilde«, »Fieberphantasien«, »Märchenerzähler«, »Traum eines großen Dichters«, »Hindernis für die Forschung« und der Rat, Wegener »möchte doch zukünftig die Finger von der Geologie lassen«, sind bezeichnend für die Intoleranz und Voreingenommenheit der seinerzeit bedeutenden Geologen. Deren Vorstellungen waren fast allein von den Gedanken geprägt, die der Österreicher E. Suess (1831–1914) in seinem Hauptwerk »Das Antlitz der Erde« (1895–1909) niedergelegt hatte. Als Vertreter der Kontraktionstheorie (besser wäre: -hypothese!) hatte er die Entstehung der Faltengebirge, wie Alpen oder Himalaja, durch Schrumpfung (Kontraktion) infolge Abkühlung der Erde seit der Bildung ihrer ersten Erstarrungskruste durch ständige Wärmeabgabe an den »Weltenraum« gedeutet. Sein oft zitierter Satz: »Der Zusammenbruch des Erdballs ist es, dem wir beiwohnen«, galt lange Zeit als grundlegend für die Erklärung des Erdbilds. Wie deutsche und andere europäische Geologen verhielten sich auch die Nordamerikaner gegenüber einer kontinentalen Drift ablehnend, obwohl man schon um die Jahrhundertwende in den Alpen weitreichende horizontal-tangentiale Bewegungen von Gesteinskomplexen als Überschiebungsdecken erkannt hatte. In Mitteleuropa war ausschlaggebend, daß einer der einflußreichsten deutschen Geologen, H. Stille (1876–1966), Wegeners Ideen völlig ignorierte und ein anderer, H. Cloos (1885–1951), sie zwar für genial, aber ganz falsch hielt, wenn er auch später anerkannte, daß Wegener »die Erde aus ihrer Starrheit erlöst und beweglich gemacht« hätte. So schien Wegener zumindest auf den Nordkontinenten für Jahrzehnte fast vergessen.

Im Gegensatz dazu blieben Wegeners Ideen in Südafrika und Südamerika lebendig. Ein früh überzeugter Anhänger Wegeners war A. L. du Toit (1878–1948) mit seinem Werk »Unsere wandernden Kontinente« (»Our wandering continents«) vom Jahre 1936, das dem Anden-

ken Alfred Wegeners gewidmet ist und sich mit dem Satz »Afrika ist der Schlüssel« voll und ganz zur Drifthythese bekannte. Du Toit stellte bei einer Exkursion in Südamerika fest, daß dieses Gebiet der Kapprovinz Südafrikas geologisch gleiche. So sehr stimmten Strukturen und Gesteine auf beiden Seiten des Südatlantiks überein.

Neben du Toit sollen der Cloos-Schüler H. Martin sowie R. Maack (1892–1969) erwähnt werden, die beide ebenfalls Südafrika und Südamerika aus eigenen Forschungen gut kannten und überzeugende Beweise für den ehemaligen Zusammenhang beider Erdteile beibrachten.

Im Gegensatz zu den Geologen fanden Wegeners Gedanken vielfach bei Botanikern und Zoologen begeisterte Anerkennung, weil sie manche Rätsel der Floren- und Faunenverteilung zu erklären vermochten.

Alfred Wegener war trotz der kritischen Haltung seiner Kollegen bis zu seinem Tode von der Richtigkeit seiner Grundideen überzeugt. Er bemühte sich ständig, weiteres Beweismaterial für seine Auffassung über die driftenden Kontinente beizubringen. Aber die meisten Geologen lehnten seine Ideen ab.

Vor rund 25 Jahren begann nun in den Geowissenschaften eine Art »Wegenersche Revolution« (J. T. Wilson 1968). F. Kossmat und S. von Bubnoff hatten bereits vor dem zweiten Weltkrieg erkannt, daß es notwendig wäre, bei der Analyse des Erdbilds über die Kontinente hinauszugehen und die Weltmeere in den Kreis der Diskussion einzubeziehen, deren »tektonische Bodenstrukturen nicht minder mannigfaltig wären als jene der Festländer«. Mit diesen hatte sich die Geologie bislang fast allein beschäftigt. Dank neuartiger Methoden der Seegeophysik, der experimentellen Petrologie, des Paläomagnetismus und anderer Disziplinen wie Mikropaläontologie, besonders aber durch Bohrungen in den Grund der meisten Ozeane sowie durch Fotoeinrichtungen und bemannte Tauchboote konnten wesentliche Erkenntnisse über Bau und Strukturen des Ozeanbodens erzielt werden. Sie wurden zur Voraussetzung für neuartige Vorstellungen. Die Entdeckung des Weltsystems der mittelozeanischen Rücken mit ihren aktiven Zentralgräben und auffälligen Querstörungen durch B. C. Heezen (1957) als ein tektoni-

sches Hauptmerkmal der Erdkruste und die Entwicklung der Gedanken von der Ausweitung des Ozeanbodens durch H. H. Hess (1960) und R. S. Dietz (1962), J. T. Wilson (1963) und andere haben in Zusammenarbeit der verschiedenen Geowissenschaften zu einer globalen Tektonik geführt, die unter dem Begriff *Plattentektonik* in kurzer Zeit erneut die Idee einer Kontinentalverschiebung zur Diskussion gestellt hat. Diese Hypothese vereinigt die Vorstellung der *kontinentalen Drift* mit der *langsamer Strömungen in einem zähflüssigen magmatischen Untergrund* als Antriebsmechanismus der Bewegungen. So ist trotz einer Reihe noch strittiger Einzelheiten ein faszinierendes Gesamtmodell – dynamisch, verblüffend einfach und doch komplex – entstanden, das von den meisten Geowissenschaftlern angenommen wurde.

Freilich ergibt sich heute die Frage, ob die teilweise extremen Vorstellungen der Plattentektonik, die zum größten Teil auf indirektem Wege gewonnen wurden, nicht wie zuvor die der statischen Kontraktionslehre bereits zu einer Art neuer geologischer »Orthodoxie« geführt haben. »Die Kontinentalverschiebung, eine neue Religion oder ein großartiger Bluff?« meint R. Dietz, selbst einer ihrer führenden Verfechter. Aber alle Einwände haben die Bedeutung Alfred Wegeners nicht zu schmälern vermocht.

Der geniale Gelehrte, der im Alter von 50 Jahren im grönländischen Inlandeis den Forschertod erlitt, hat die Geowissenschaften in ihrer ganzen Breite befruchtet. Der Kanadier T. Wilson vergleicht die gegenwärtige Renaissance der Wegenerschen Ideen mit der Revolution eines Kopernikus, dessen dynamisches Weltbild das alte statische des Ptolemäus ablöste. Seine damals neuartigen Gedanken hätten sich auch erst ein halbes Jahrhundert später durchgesetzt. Es besteht zwischen beiden aber doch wohl insofern ein grundsätzlicher Unterschied, als das heliozentrische Weltbild des Kopernikus keine Hypothese, sondern eine mathematisch abgesicherte physikalische Theorie ist, während die Kontinentaldrift trotz vieler beweiskräftiger Argumente im einzelnen manche Unsicherheiten enthält. Sie ist ein Anschauungsbild, eine Hypothese mit einer Reihe Fragezeichen. Doch spricht mehr für als gegen sie.

---

# Ein Blick ins Erdinnere

---

Die Strahlung der Sonne als maßgebliche Kraftquelle setzt klimaabhängige Prozesse in Bewegung, die wie fließendes Wasser, Eis oder Wind das Relief der Kontinente formen und daher als geomorphologische Vorgänge bezeichnet werden. Diese exogenen Erscheinungen setzen voraus, daß Kräfte, die ihren Sitz in den tieferen Zonen der Erde haben, das Erdbild im großen, wie die Verteilung von Kontinenten und Ozeanen oder von Gebirgen und Flachländern, gestaltet haben. Erdbeben und vulkanische Phänomene sind sichtbare Zeugen für das Wirken dieser endogenen Kräfte und Kräftezusammenspiele.

Wie sieht es aber im Inneren der Erde aus? Die tiefste Bohrung auf der Halbinsel Kola (UdSSR) hat gegenwärtig gerade 13 000 m überschritten und soll 15 000 m erreichen, die tiefste Bohrung in Mitteleuropa beträgt 8 004 m, und eine in den USA ist 9 583 m tief. Diese Ausmaße erscheinen beachtlich, und doch sind das alles nur Nadelstiche in die Haut der Erde, deren Radius 6 371 km beträgt.

Wie gelangt nun die Wissenschaft zu Kenntnissen über den Gesamtaufbau und die stoffliche Zusammensetzung der Erde, wenn ihr direkte Beobachtungen am Material nur bedingt möglich oder verschlossen sind? Gesteinsfragmente aus größerer Tiefe, die durch vulkanische Kräfte bis zur Erdoberfläche emporgeschleudert wurden oder durch gebirgsbildende Bewegungen ihre heutige Position erlangt haben, sind selten. Ein Beispiel ist die Struktur von Ivrea in den italienischen Alpen, rund 50 km nördlich von Turin. Hier gelangt man in nordwestlicher Richtung aus kieselsäurereichen Gneisen und Graniten der oberen Erdkruste über kieselsäureärmere basische

umgewandelte Gesteine (Amphibolite) und Gabbros der Unterkruste in ultrabasische peridotitische Erdmantelgesteine. Damit hat man eine Abfolge des Aufbaus von Kruste und oberstem Mantel im Kontinentalbereich vor sich. Die stofflich einheitlichere ozeanische Kruste ist auf der Insel Zypern zu beobachten, wo unter basaltischen Gesteinen und Laven ebenfalls Peridotite des Mantels vorhanden sind.

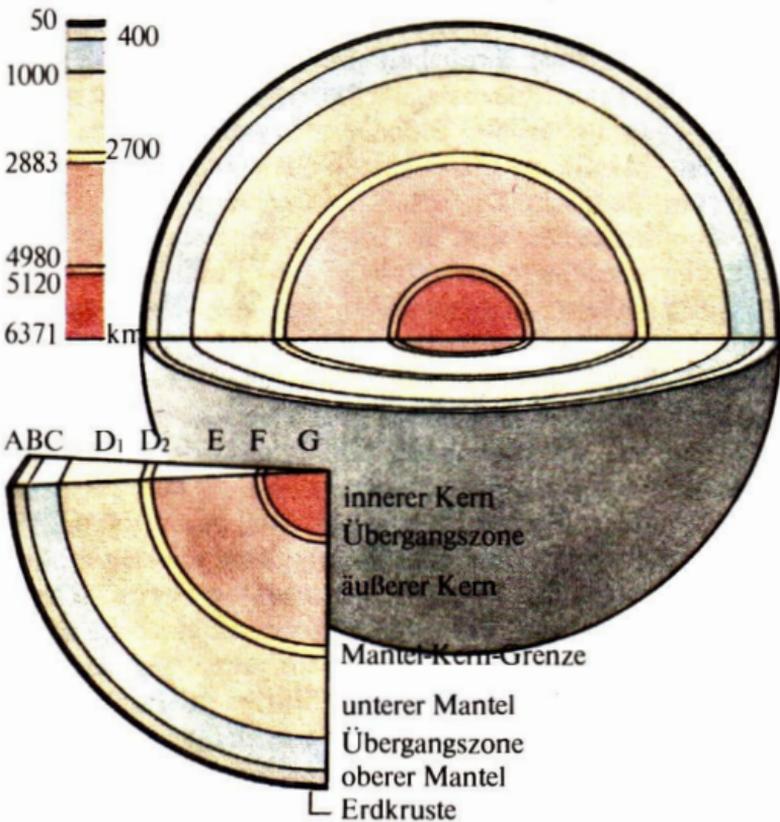
Wenn es nur wenige Möglichkeiten direkter Beobachtungen gibt, müssen Messungen und Untersuchungen indirekter Art, solche der Geophysik, Geochemie und Astrophysik, Informationen liefern. Laborprüfungen an Gesteinsmaterial in Autoklaven unter hohen Drücken und bei hohen Temperaturen ermöglichen wesentliche Erkenntnisse. Neben Messungen des Schwerefeldes, des Wärmeflusses oder der elektrischen Leitfähigkeit der Erde, die örtlich Abweichungen vom Normalwert, mithin Anomalien, aufweisen, sind besonders Beobachtungen von Erdbebenwellen oder solchen bei großen Sprengungen von Bedeutung. Erdbeben sind plötzliche Ausgleichsbewegungen der Erdkruste, sind die Auslösung angesamelter Spannungen. Bei Erdbeben wird ein Teil der tektonischen Energie in elastische Wellen verwandelt, oder anders ausgedrückt: Die Erschütterungen pflanzen sich in Wellenbewegungen fort. In Beobachtungsstationen werden die verschiedenen Wellen von Erdbebenmessern (Seismographen) aufgezeichnet. Aus den Seismogrammen vermag der Geophysiker nicht nur Ort, Zeit und Intensität eines Bebens zu ergründen, sondern auch Schlüsse über den Aufbau des Erdkörpers zu ziehen. Weg und Laufzeit der Erdbebenwellen lehren, daß ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht geradlinig verläuft, sondern infolge stofflicher Inhomogenitäten der tieferen Erdzonen verlangsamt oder beschleunigt bzw. abgelenkt oder gebrochen wird. Das erfolgt an bestimmten Grenzflächen, den Unstetigkeitsflächen oder Diskontinuitäten, die nicht völlig konzentrisch das Erdinnere umgeben. Die Auswertung Tausender Seismogramme führte zu der Vorstellung, daß die Erde schalenförmig aufgebaut ist.

Die äußere, relativ dünne Haut ist die *Erdkruste*, deren oberer Teil in seiner chemischen und mineralischen Zu-

sammensetzung im Vergleich mit den tieferen Schalen hinlänglich bekannt ist. Die äußere Erdkruste besteht innerhalb der Kontinente Mitteleuropas aus granitischen, gneisartigen und sedimentären Gesteinen von 12 bis 15 km Mächtigkeit, die untere aus basaltischem Material.

Die Grenze zwischen beiden Schalen ist nach ihrem Entdecker, dem österreichischen Geophysiker V. Conrad, benannt. An dieser Conrad-Diskontinuität steigen die Geschwindigkeiten der P-Wellen (Longitudinal-, Verdichtungs- oder Druckwellen), bei denen die Materieteilchen in Richtung des Fortschreitens der Welle schwingen, wie bei den Schallwellen, von 5,0 bis 6,0 km/s auf 6,0 bis 6,5 km/s an. Das führt man auf eine unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der oberen, sauren, kiesel-säurereichen, granitischen und der darunter folgenden

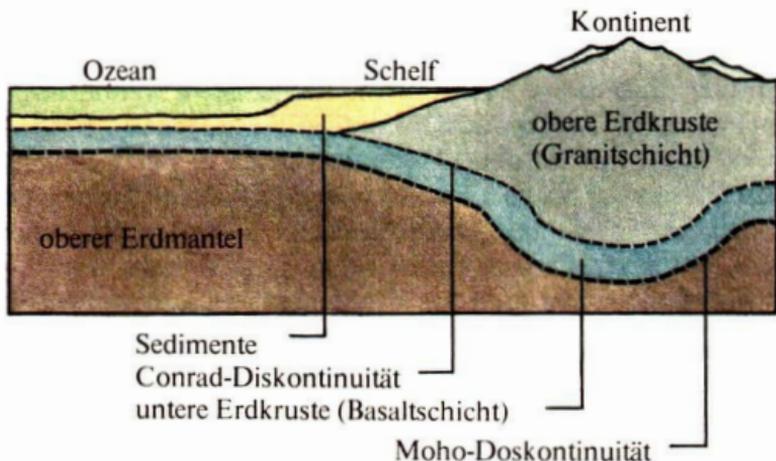
*Der Schalenaufbau der Erde*



basischen, kieselsäureärmeren basaltischen Gesteine (Gabbro) zurück, ohne daß darüber völlige Klarheit bestünde. Und das um so weniger, als bei der Kolaborung, bei der man die Conrad-Diskontinuität aufgrund geophysikalischer (seismischer) Untersuchungen in 7000 m Tiefe erwartet hatte, bis zu 12000 m über 3 Milliarden Jahre alte kristalline und granitische Gesteine auftraten und die »Basaltschicht« anscheinend fehlt. Eine weitere Überraschung bedeutete auch das Vorhandensein hochmineralisierter Lösungen in 4500 m Tiefe und erzführender Gesteine bis in 6500 m Tiefe und mehr.

## Von der Kruste zu den tieferen Erdschalen

Die Dichte der Granit- bzw. Gneisschicht beträgt 2,6 bis 2,7 g/cm<sup>3</sup>, die der tieferen Basalt- oder Gabbroschicht 2,9 bis 3,0 g/cm<sup>3</sup>. Die Stärke der oberen Granitschicht schwankt im einzelnen erheblich. Sie fehlt in den mittleren Teilen der großen Ozeane überhaupt. Während die *Erdkruste*, also Granit- und Basaltschicht, in den Kontinenten zwischen 25 und 50 km mächtig wird, erlangt die in den Ozeanen allein vorhandene Basaltschicht nur um 5 bis 8 km. Eine äußerst markante und allenthalben nachweisbare Diskontinuität bildet die Grenze zwischen Erdkruste und dem darunter folgenden *Erdmantel*, sozusagen dem »Fruchtfleisch« der Erde. Diese Diskontinuität ist nach ihrem Entdecker, dem jugoslawischen Seismologen A. Mohorovičić (1857–1936), benannt und heißt abgekürzt Moho. An dieser Grenzfläche steigen die Wellengeschwindigkeiten der P-Wellen sprunghaft von rund 7,0 auf 8,1 bis 8,3 km/s an. Die Moho liegt in Mitteleuropa zwischen 28 und 35 km Tiefe, sinkt aber unter jungen Faltengebirgen wie den Alpen (und auch dem Himalaja) auf 50 bis 80 km ab. In den Gebirgswurzeln erlangt die Erdkruste also ihre höchste Mächtigkeit, während die Moho unter den Böden der Ozeane schon in 8 bis 12 km Tiefe festgestellt wurde. Unter der Moho folgt der Erdmantel, der bis zu 2900 km Tiefe reicht und durch eine Diskontinuität in einen oberen und einen unteren Teil gegliedert



*Unter den Kontinenten steigt die Mächtigkeit der kontinentalen Granitkruste erheblich an, während sie unter den Ozeanen fehlt.*

ist. Besonders markant ist im oberen Erdmantel eine Zone in rund 100 bis 300 km Tiefe, in der sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen, speziell der S-Wellen<sup>1</sup> auffällig verringert, um tiefer erneut anzusteigen. Gutenberg hat daher von der »Langsamzone« (low-velocity-layer) gesprochen. Er hat sie stofflich so gedeutet, daß infolge der herrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse das Gesteinsmaterial bei einer auf  $3,0\text{g/cm}^3$  ansteigenden Dichte nicht mehr wie die darüber befindlichen starren Schalen fest ist, sondern einen durch Strömungswalzen gekennzeichneten zähflüssigen, sozusagen plastisch-schmelzflüssigen oder sirupartigen Zustand aufweist. Daher bezeichnet man diese Zone auch als »Fließzone« oder *Asthenosphäre*. Zugleich zeichnet sich dieser Bereich durch eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit aus. Hier vermutet man die Magmenkammern des primären Basaltmagmas, das von da aus in Spalten bis zur Erdoberfläche gedrückt werden kann.

Es ist lange darüber gestritten worden, ob die Moho eine Grenzfläche physikalischer oder chemischer Natur

<sup>1</sup> Transversal- oder Scherungswellen, wobei das Schwingen senkrecht zum Fortschreiten der Welle in vertikaler und horizontaler Richtung erfolgt

ist. Aus experimentellen Befunden und durch Beobachtungen an – beim Aufstieg basaltischer Schmelzen aus der Tiefe mitgerissenen – Gesteinsbruchstücken, wie man sie z. B. als Einschlüsse (Xenolithe) in Basaltgesteinen der Oberlausitz oder des Baikargebietes findet, darf man schlußfolgern, daß olivinreiche Gesteine mit geringen Anteilen anderer Minerale (Pyroxen, Granat) vorliegen. Es sind Peridotite, deren Hauptmineral Olivin ( $\text{Mg, Fe}_2\text{SiO}_4$ ) eine hohe Dichte von 3,3 bis  $4,2 \text{ g/cm}^3$  besitzt. Somit handelt es sich bei der Moho wohl um eine chemische Grenze. Vermutlich scheidet sie unter den Kontinenten Granulite von ultrabasischen Gesteinen des obersten Mantels. Unter den Ozeanen dürfte es sich um eine Grenze zwischen zu den Basalten gehörigen Tiefengesteinen (Gabbro) und ultrabasischen Tiefengesteinen (Peridotiten) des oberen Mantels handeln, die durch Wasseraufnahme (Hydratation) in metamorphe Serpentine umgewandelt worden sind. Man faßt diese magmatischen, grünlichen Gesteinsfolgen (einschließlich der mit ihnen verknüpften Tiefseesedimente) als *Ophiolithe* zusammen.

Zuvor war man vielfach der Auffassung, daß der Mantel aus Eklogit, einem metamorphen Gestein hoher Dichte (etwa  $3,5 \text{ g/cm}^3$ ) zu gleichen Anteilen aus Pyroxen und Granat, bestünde. Die Moho stelle einen stofflichen Übergang von basischen zu ultrabasischen Gesteinen ohne Veränderung der chemischen Gesamtzusammensetzung dar, sei also eine *physikalische*, eine Phasengrenze.

Solange es noch nicht gelungen ist, durch übertiefe Bohrungen Gesteinsmaterial zutage zu bringen, ist eine allen Beobachtungen gerecht werdende, endgültige Entscheidung kaum möglich.

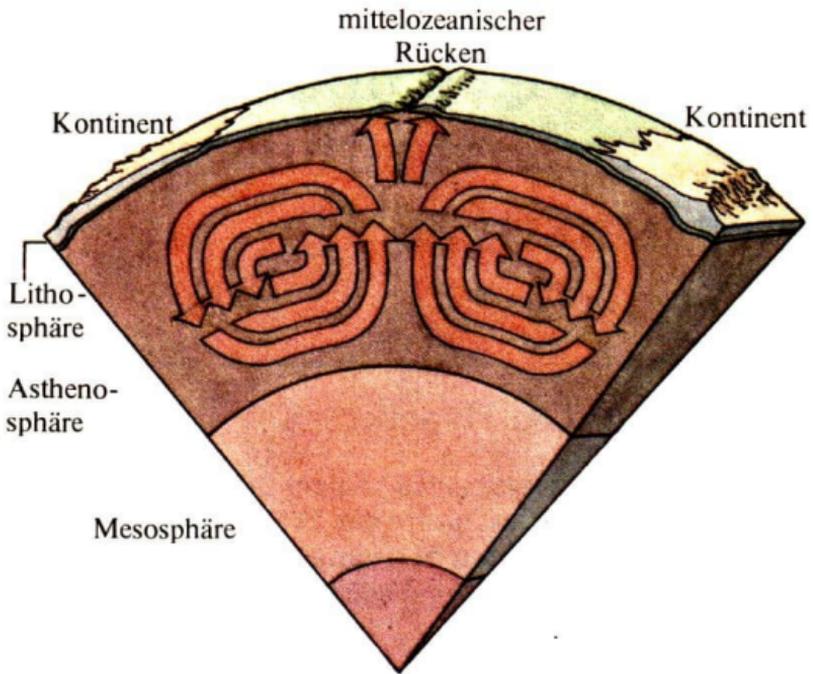
Bis etwa 1000 km Tiefe schließt sich im oberen Erdmantel eine Übergangszone an, in der die Wellengeschwindigkeiten infolge stofflicher Inhomogenitäten ansteigen. Die silikatischen Minerale nehmen immer mehr eine oxidische Struktur an.

Im unteren Erdmantel bis zur Grenze von Mantel und Kern in 2900 km Tiefe nimmt die Dichte ständig zu, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen erreichen knapp  $14 \text{ km/s}$ . Im Gegensatz zur Moho

wird allgemein die Meinung vertreten, daß die hier vorhandenen Diskontinuitäten nicht chemischer Natur sind. Bei etwa gleichem Chemismus des Materials beruhen sie infolge der herrschenden Temperaturen und Drücke auf Phasenänderungen, indem die Atome in den Kristallgittern dichter gepackt sind und Hochdruckmodifikationen bilden. Aus silikatischen Olivinen bilden sich oxidische Spinelle der Formel  $AB_2O_4$ , wie der Magnetit  $FeFe_2O_4$  oder der Chromit  $Cr_2FeO_4$ . Inwiefern außer vertikalen Änderungen chemischer und physikalischer Natur im Erdmantel seitliche Inhomogenitäten vorhanden sind, ist strittig. Nach seismischen Befunden zu urteilen, sind sie nicht unwahrscheinlich.

Der untere Erdmantel wird vom *Erdkern* durch eine Diskontinuität in einer Übergangszone zwischen 2800 und 2900 km Tiefe getrennt. Diese Zone zeichnet sich durch eine auffällige, schlagartige Verringerung der Geschwindigkeit der seismischen Wellen auf 8,1 bis 10,4 km/s aus, um tiefer erneut stufenweise und ab rund 5100 km stärker zuzunehmen, während die Dichte absinkt. Daher darf man schließen, daß sich der obere Erdmantel in einem quasiflüssigen Zustand (»weicher Kern«) befindet, im Gegensatz zum inneren Kern bis in 6371 km Tiefe, der fester sein dürfte (»harter Kern«). Die alte Auffassung, daß der Erdkern aus metallischem Nickel-Eisen (Nife) bestünde, wird gegenwärtig kaum noch vertreten, weil die gemessenen Dichtewerte mit dieser Vorstellung nicht übereinstimmen. Es könnte aber sein, daß Nickel-Eisen und dazu leichtere Elemente die vorhandene Dichte bis zu  $11,3 \text{ g/cm}^3$  erklären. Die im Jahre 1941 von den Schweizern W. Kuhn (Physikochemiker) und A. Rittmann (Vulkanologe) aufgestellte Hypothese, daß sich im Erdkern noch ursprüngliche Sonnenmaterie befände, ist in Einzelheiten, nicht im ganzen entkräftet.

Auf Grund neuer Erkenntnisse und Vorstellungen gliedert man die höheren Schalen der Erde gegenwärtig so: Die feste Erdkruste und der oberste Teil des Erdmantels zwischen Moho und Asthenosphäre stellen die starre und spröde *Lithosphäre* dar, deren Basis die obere Grenze der Asthenosphäre bildet. Die Lithosphäre besteht aus unterschiedlich mächtigen Großschollen oder Platten von 70



*In der zähflüssigen Asthenosphäre im oberen Erdmantel erfolgt ein Wärmetransport durch eine Materialströmung (Konvektion). Diese zähe Strömung, die schätzungsweise 3 bis 5 cm jährlich beträgt, bewegt die darüber befindlichen Schollen der Lithosphäre. Die beiden Strömungswalzen auf unserer Skizze bewirken Zerrungen in der Erdkruste. Allmählich entsteht eine Bruchzone, in der Magma nach oben dringt. Die mittelozeanischen Rücken sind das Ergebnis eines solchen Prozesses.*

bis 80 km (Ozeane) bzw. 100 bis 140 km (Kontinente) Stärke. Die *Asthenosphäre* ist der quasischmelzflüssige höhere Mantelbereich, in dem in 100 bis 300 km Tiefe infolge eines stofflich und thermisch inhomogenen Aufbaus besonders im oberen Teil ringförmige thermische Ausgleichsströmungen (Konvektionsströme) auftreten, die die Bewegungen der Lithosphärenplatten steuern. Die Asthenosphäre entspricht der erwähnten Langsamzone. Die unterhalb der Asthenosphäre folgende dichtere und wieder festere, weniger fließfähige *Mesosphäre* im tieferen Mantel erscheint nur insofern mit den Bewegungen der Lithosphäre verbunden, als hier die Antriebsmechanismen für die Veränderungen gesucht werden.

---

# Bewegungen und Massenverlagerungen der Erdkruste

---

## Geotektonische Hypothesen

Geologie ist die Wissenschaft von der Zusammensetzung, dem Bau und der Geschichte der Erde, insbesondere der Lithosphäre. Bei unseren Betrachtungen interessieren die Bauelemente, die Strukturen oder kurz: Bau und Baustile der Gesteinskomplexe.

Die Lehre vom Bau der Lithosphäre, den Bewegungsvorgängen und der Analyse der verursachenden Kräfte heißt *Tektonik*. Die tektonischen Vorgänge werden entscheidend von den Kräften in den tieferen Zonen der Erde gesteuert, zu denen, diese überlagernd, die Erdrotation und Gleichgewichtskräfte, aber auch außerirdische, kosmische Kräfte treten. Wie der Architekt unterschiedliche Entwürfe für Bauten vorlegt, ist der Geologe sozusagen der Architekt der Lithosphäre. »Gebirge sind«, wie H. Cloos es ausdrückt, »Stein gewordene Bewegungen.«

Die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der Lithosphäre, die Beziehungen zwischen den Krustenbewegungen und Massenverlagerungen in den tieferen Erdschalen untersucht die *Geotektonik*. Geotektonik ist zugleich umfassender Begriff für die globale Tektonik geworden. Es bestehen Zusammenhänge zwischen den Erscheinungen sowie Vorgängen in der Lithosphäre und den tieferen Erdzonen. Daher mußte man die Bereiche, in denen sich die Bewegungen vollziehen, nach der Tiefe zu erweitern. Man nennt diese Bereiche zusammenfassend nach einem Vorschlag von R. Schwinner *Tektonosphäre* und versteht darunter die Erdschalen bis in rund 700 km Tiefe. Hier hat man die tiefsten Erdbeben festge-

stellt. Die Tektonosphäre umfaßt Lithosphäre, Asthenosphäre und oberste Mesosphäre.

Die unterschiedlichen Versuche, die Ursachen der Bewegungen und Massenverlagerungen sowie die entstandenen weltweiten Strukturen theoretisch zu erklären, heißen geotektonische Hypothesen. Während sich bis vor wenigen Jahrzehnten die Überlegungen vorwiegend auf die Entstehung der Faltengebirge bezogen, stehen heute die Analyse der großen Krustentypen der Erde, der Bau der Kontinente und der Böden der Tiefmeere im Vordergrund. Nur ein kleiner Teil davon sind Gebirge im obigen Sinne.

Es gibt zahlreiche einander widersprechende geotektonische Hypothesen. Im Laufe von mehr als einem Jahrhundert sind sie von verschiedenen Forschern in Abhängigkeit vom Wissen und den allgemeinen Kenntnissen ihrer Zeit, aber auch vom persönlichen Arbeitsgebiet ausgearbeitet worden. Keine geologische Hypothese ist frei von regionalen Erfahrungen. Es ist nicht gleichgültig, ob der eine seine Erfahrungen in den weiten Flachlandgebieten der Russischen Tafel, ein anderer in jungen Faltengebirgen wie den Alpen oder dem Himalaja und ein dritter in ozeanischen Bereichen gewinnt. Durch die Fortschritte, die die Geowissenschaften mit dem Vorstoß des Menschen in schwer oder zuvor unzugängliche Gebiete, durch die Untersuchungen der Ozeanböden und durch die Ergebnisse der Raumfahrt (Mond, Planeten) erzielt haben, ist man gerade in den letzten 25 Jahren zu neuen Vorstellungen gelangt. Dabei ist es zu einer gewissen Verbindung zwischen widersprüchlichen Grundauffassungen gekommen.

## Zwei extreme Gedankengebäude

Bis vor rund 25 Jahren herrschte bei der Mehrzahl der Geologen die Anschauung, daß die Erdkruste im ganzen oder mit ihren Teilen fest mit ihrer Unterlage verbunden und die geographische Lage der Kontinente und Ozeane in der erdgeschichtlichen Vergangenheit immer die gleiche gewesen wäre. Lediglich vertikale Bewegungen der

Krustenschollen hielt man für gegeben, die durch Hebung oder Absenkung zur Verschiebung der Strandlinien und damit zu Vorstößen oder Rückzügen des Meeres führten. Man nennt diese Lehre *Fixismus* bzw. fixistisch. Unter den lebenden Geotektonikern vertritt beispielsweise der bekannte Moskauer Professor V. V. Belousov eine hierher gehörige Auffassung.

Die gegenteilige Lehre, daß Großschollen der Lithosphäre horizontal-tangentiale Lageveränderungen ausführen und frei über ihre Unterlage gleiten oder wandern, heißt *Mobilismus* bzw. mobilistisch. Alfred Wegener war mit seiner Hypothese einer Kontinentalverschiebung nicht der erste, der von einem Auseinanderbrechen der Kontinente gesprochen hat. Das hat er selbst in seinem Buch »Die Entstehung der Kontinente und Ozeane« ausgeführt. Sein unvergängliches Verdienst wird bleiben, daß er über vage Vorstellungen und unwissenschaftliche Begründungen hinaus, wie z. B. zuvor durch Hinweise auf die biblische Sintflut, versucht hat, seine Ideen durch beweiskräftige (und teilweise auch nicht haltbare) Argumente zu belegen und sich kritisch mit den Einwänden seiner Gegner auseinanderzusetzen.

## Kontraktion und Expansion

Rund 150 Jahre alt ist die Vorstellung, daß die Erde durch Abkühlung seit der Zeit ihrer Entstehung vor etwa 4,5 Milliarden Jahren aus einem gasförmigen oder flüssigen Zustand und durch Zusammenziehung des noch glutflüssigen Erdinneren unter der erstarrten Außenhaut ständig geschrumpft sei. Diese Lehre von der *Kontraktion* war über viele Jahrzehnte für die Geologen unanfechtbar, konnte sie doch die Entstehung der Faltengebirge als Einengungsgebilde plausibel erklären. Zu ihren Vertretern gehörten z. B. der Österreicher E. Suess, der Schweizer A. Heim, der Franzose M. Bertrand, der Amerikaner W. H. Bucher oder der Deutsche H. Stille (1876–1966), zuletzt Ordinarius in Berlin und Mitglied der Akademie der Wissenschaften, der meinte, die Kontraktion halte noch heute an.

Außer der Abkühlungsschrumpfung sind später als Ursachen Verdichtung der Materie im Erdinneren durch interatomare Vorgänge, durch gravitative Kontraktion (L. Kober), thermisch-gravitative Prozesse (O. Jessen) oder ungleichmäßige Erwärmung der Zwischenschicht der Erde durch radioaktive Ereignisse (Hardley) postuliert worden. Die Kontraktionshypothese vermag aber die Bögen, Schleifen und Girlanden der Faltengebirge im Raum des europäischen und amerikanischen Mittelmeeres oder am Rande von Ostasien ebensowenig befriedigend zu erklären wie die zeitlich ungleichmäßigen tektonischen Bewegungen oder die gewaltigen Zerrungsgebiete der Kontinente und die riesigen Ozeangraben.

Gleiches gilt für die gegenteilige Auffassung von der ständigen Vergrößerung oder *Expansion* der Erde, die zu einer Zunahme des Erdradius geführt habe (S. W. Carey, L. Eged, O. C. Hilgenberg u. a.). So soll die Erde vor dem Beginn der Expansion im Präkambrium nur einen Durchmesser von 7000 km und das halbe heutige Volumen gehabt haben. Während ältere Vertreter der Hypothese die durch radioaktiven Zerfall erzeugte Wärme für größer annehmen als die nach außen abgeführte, ging man später von einer thermischen Expansion und von Umwandlungen der innerirdischen Materie aus dichten Hochdruckmodifikationen der Minerale in weniger dichte Niederdruckmodifikationen oder auch von einer immerwährenden Neubildung von stofflicher Substanz aus. Das Auseinanderbrechen der großen Kontinente wird demzufolge nicht durch Verschiebung, sondern durch Expansion erklärt. So deutet der Australier S. W. Carey die Erdexpansion durch Ausweitung des Ozeanbodens. Eine mögliche Verschluckung von Kruste hält er dagegen für einen »Mythos« oder eine »Fiktion«.

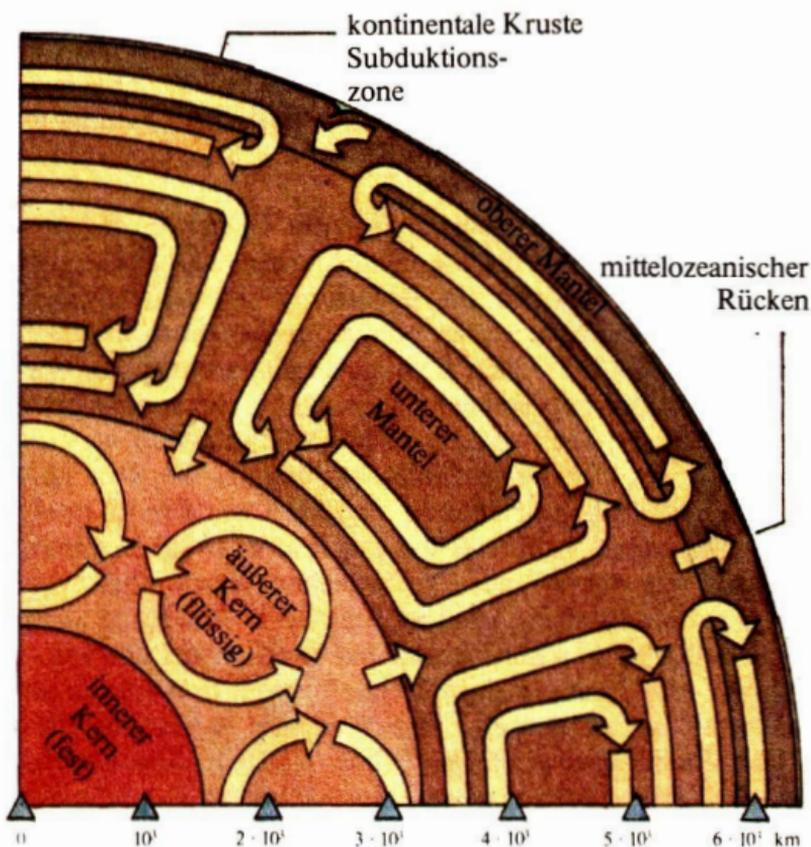
Die Expansionshypothese vermag durchaus die Bruchzonen der Erde als Formen einer Ausweitung, auch Lageveränderungen von Kontinenten zu erklären, nicht aber die Einengungsgebilde wie die großen Faltengebirge. Wenn eine stärkere Expansion vorhanden wäre, müßte sich die Tagesdauer bis heute aber verdreifacht haben. Nach paläontologischen Untersuchungen an devonischen Korallen mit deutlicher tages- und jahresperiodischer

Bänderung kann es keine wesentliche Expansion gegeben haben.

Diesen Schwierigkeiten versucht die Pulsationshypothese der sowjetischen Geologen M. A. Ussov und W. A. Obrutčev (1940) dadurch zu begegnen, daß sie *Pulsationen*, einen rhythmischen Wechsel der Entstehung von Ausweitungs- und Einengungsstrukturen, annimmt. Diese Vorgänge sollen in Zusammenhang mit Aufschmelzungsprozessen infolge Erwärmung und mit Erstarrungsvorgängen infolge Abkühlung stehen. So soll es zu einer Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Erdradius kommen, in Abhängigkeit vom jeweiligen Stabilitätsgrad der Erdkruste. Kosmische Ursachen werden nicht ausgeschlossen. Wie sich so gegensätzliche Prozesse wie Erwärmung und Abkühlung bei einer doch gleichartigen Wärmequelle zyklisch wiederholen sollen, bleibt unklar.

## Der Motor in der Tiefe?

Zweifellos war es in einer Zeit, in der die Vorstellung von der Erdkontraktion herrschte, ein kühner Gedanke, das »Bewegungsbild von Faltengebirgen« dadurch zu deuten, daß regional wirkende *thermische Konvektionsströmungen* in zähplastischen subkrustalen Tiefenbereichen für die Gestaltung des Erdbilds verantwortlich sein sollten. Diese Idee entwickelte im Jahre 1906 der österreichische Alpengeologe O. Ampferer, Mitarbeiter der Geologischen Reichsanstalt in Wien. Es kam ihm zugute, daß er sich als Student zunächst der Physik zugewandt hatte, um dann später als begeisterter Alpinist auf die Geologie umzusatteln. Ampferer studierte in einer Zeit, als man zunächst im westalpinen Raum Überfaltungsdecken und dann in den Ostalpen horizontale Verfrachtungen von Gesteinskomplexen beobachtet hatte. Der Mechanismus war mit den Schrumpfungsideen nicht in Einklang zu bringen. Ampferer war nicht damit zufrieden, zu erkennen, daß bestimmte Prozesse abliefen, sondern ihm ging es darum zu erfahren, wie alles ablief. Da er mit seinen Ideen seiner Zeit voraus war, erging es ihm nicht anders als Alfred Wegener. Die damals führenden Geologen



*Die Erde als globales System ineinandergreifender Kreisläufe (nach R. Siever 1983). Die Pfeile deuten die großräumigen Bewegungen in den Hauptteilen der Erde an. Die von Wärme angetriebene Konvektion im flüssigen äußeren Erdkern erzeugt das Magnetfeld der Erde (Dynamoeffekt). Die Konvektionsströmungen im oberen Mantel bilden den Antrieb für die plattentektonischen Vorgänge.*

schwiegen ihn tot oder lehnten seine Vorstellungen ab.

Ein anderer Österreicher, der Grazer R. Schwinner, hatte ebenfalls zunächst Mathematik und Physik studieren wollen, doch dann hatte auch er sich der Geologie zugewandt. Er promovierte bei dem Schweizer Altmeister A. Heim in Zürich und war wohl der erste, der auf den engen Zusammenhang und die innere Verknüpfung von Gebirgsbildung und Vulkanismus stieß. Wie Ampferer war Schwinner ein Gegner der Kontraktionshypothese. Als Ursache der Gebirgsbildung sah er Konvektionsströme

innerhalb des Raumes, in dem sich die tektonischen Bewegungen vollziehen, seiner »Tektonosphäre«. Die aufsteigenden Äste sollten zu vulkanischen Erscheinungen, die absteigenden zu Krustenverengung und Gebirgsbildung führen.

Ein 1911 von Ampferer geäußertes Gedanke, den wir als grundlegenden Vorgang in der neuen Globaltektonik wiederfinden, gewinnt an Bedeutung: Verschluckungs- oder Subduktionsbereiche, von Konvektionsströmungen abhängige Abtauch- und Einsaugvorgänge unter den Gebirgen. Sowohl bei Ampferer als auch bei Schwinner bleiben das mehr oder weniger örtliche Phänomene in Verbindung mit der Faltegebirgsbildung, nicht etwa globale, das Bild beherrschende Vorgänge wie Kontinentalverschiebungen. Ampferer hat erst später (1919) in einem Vortrag vor der Wiener Geologischen Gesellschaft von einer »ursächlichen Verknüpfung von Unterströmung und Drift« gesprochen. Damit hat er als erster das angedeutet, was heute unsere Vorstellungen beherrscht. Er rechnete schon damals, von Wegener beeinflusst, mit »Verschiebungen größeren Stils«. »Die Unterströmung hat wenigstens zeitweise weit ausgedehntere Bereiche der Erdhaut in Bewegung gesetzt.« In seinem letzten Vortrag in der Geologischen Bundesanstalt in Wien im Jahre 1937 hat er bescheiden festgestellt, daß Alfred Wegener mit seiner Drifthythese alle bisherigen Anschauungen über horizontale Bewegungen in der Erdkruste durch ihre gewaltigen Ausmaße revolutioniert habe. Seine Gedanken von der Unterströmung und Wegeners Idee von der Drift seien innerlich verwandt, wenn auch seine Annahme mit der Wegeners nicht gleichwertig sei. Schwinner hat sich dagegen zur Kontinentalverschiebung viele Jahre kaum oder nur kurz kritisch geäußert, später aber den Gedanken der driftenden Kontinente als nicht unmöglich angesehen.

## Wieder andere Deutungsversuche!

Der Berliner Geologe E. Haarmann (1931) fußt insofern auf O. Ampferer, als auch er jede Kontraktion ablehnt

und eine thermisch bedingte Aufwärtsbewegung des Magmas der tieferen Zonen anerkennt. Bei ihm sind vertikale Bewegungen von Kontinentalblöcken, mithin Hebungen und Absenkungen, die primären Vorgänge. Kosmische Einflüsse stören das irdische Gleichgewicht, dessen Wiederherstellung notwendig ist. Mobile magmatische Massen, die sich nach oben verlagern, erzeugen Dehnungen in der sedimentären Hülle. Diese reißt schwerkraftbedingt bei ausreichender Reliefenergie auseinander, gleitet ab und entwickelt sich aus isostatischen oder hydrostatischen Gründen zu großen Buckeln und Beulen, den Geotumoren, bzw. Einsenkungen, den Geodepressionen, wie sie in den Faltegebirgen zu beobachten sind. Einer vertikalen, radialen Primärtektonogenese stehen allein durch Schwerkraftgleitung bedingte horizontale, sekundärtektonogenetische Folgebewegungen gegenüber, die sich in Falten und Verschiebungen zeigen. Haarmann hat versucht, für Dehnungs- und Ausweitungsstrukturen, die Kontraktion und Expansion nicht zu deuten vermochten, eine gangbare Erklärung zu finden. Er spricht von *Oszillationen* der Kruste, bei denen in fixistischem Sinne die Komplexe im ganzen an Ort und Stelle bleiben. Seine Hypothese, die speziell im außeralpinen Mitteleuropa entwickelt wurde, fand weder bei den Alpengeologen noch bei den im pazifischen Raum arbeitenden Geowissenschaftlern Zustimmung.

In einer Zeit, in der horizontal-tangentiale Bewegungen in neuen Hypothesen eine Rolle spielten, hat Haarmann, wie man es ausgedrückt hat, eine »Ehrenrettung« der vertikalen Komponente unternommen. Haarmann hat, wie Schwinner den Begriff »Tektonosphäre«, als erster die Kategorie »Tektonogenese« für tektonische, strukturbildende und gefügeverändernde Bewegungen verwendet.

Aus sprachlichen Gründen benutzen wir besser den Begriff *Tektonogenese* und nennen die von tektonischen Vorgängen einheitlich gestalteten Abschnitte der Lithosphäre Tektogene. Kritisch hat man zu Haarmanns Vorstellungen unter anderem eingewandt, daß die Ursachen für seine Geotumorbildung nicht ausreichend begründet seien und die Hypothese weder die tektogenetisch-mag-

matische Entwicklung eines Faltengebirges noch den Zusammenhang zwischen sedimentärer Hülle und kristallinem Untergrund berücksichtige.

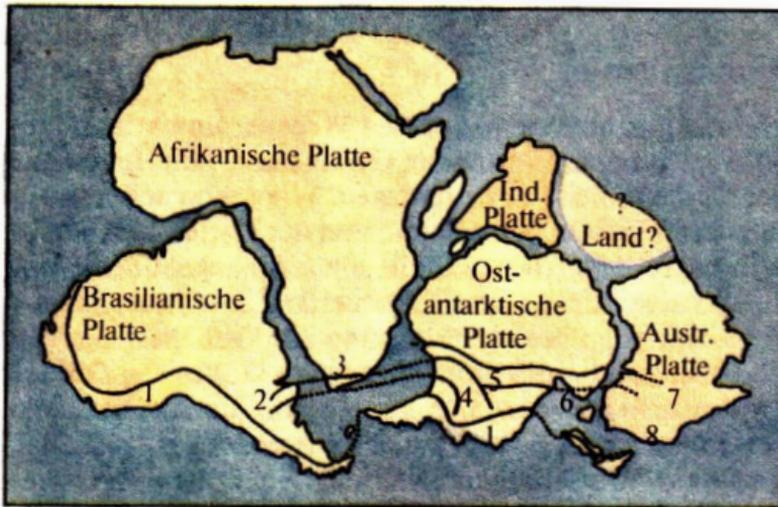
Eine Weiterentwicklung von Haarmanns Oszillationshypothese sind die Undationsvorstellungen des Niederländers R. W. van Bemmelen, denen auch der sowjetische Geotektoniker V. V. Belousov nahesteht. Ausgehend von Untersuchungen in den Alpen und im indonesischen Raum, postuliert van Bemmelen vertikale Krustenbewegungen, die von aktiven, magmatischen, physikalisch-chemisch bedingten Strömungen im Erdmantel gesteuert werden. Er nennt diese großräumigen, wellenförmigen Krustenverbiegungen *Undationen*. Energiequellen aller tektonischen Prozesse sind Gravitation, Erdwärme und Erdrotation. Im Gegensatz zu Haarmann versucht van Bemmelen, die vielseitigen Strukturen und Anordnungen der Faltengebirge und die Verbindungen zwischen Tektonogenese und magmatischen Prozessen zu analysieren. In seine Hypothese, zunächst rein fixistisch entwickelt, baute er später Gedanken der Kontinentalverschiebung ein.

Jede Tektonogenese hat das Bestreben, Gleichgewichtsstörungen unterschiedlicher Art über Ausgleichsbewegungen zu überwinden. Van Bemmelen hat sich die Aufgabe gestellt, fixistisches und mobilistisches Gedankengut miteinander zu verbinden und ein wandlungsfähiges Bild zu erschließen, das neue Ergebnisse der geowissenschaftlichen Forschung auf Kontinenten und Ozeanen aufzunehmen in der Lage sein soll. Sein Ziel ist es, eine einheitliche Erklärung geodynamischer Prozesse zu vermitteln. Bereits 1967 hat er die Hypothese vertreten, daß geodynamische Prozesse in regionalem Rahmen zu einem fixistischen, die globalen tektonischen Merkmale der Erde aber zu einem mobilistischen Modell führen. Alle geotektonischen Vorgänge sind für ihn das Ergebnis eines komplizierten und komplexen Systems von auf- und übereinandergelagerten Massenverlagerungen unterschiedlicher Dimensionen innerhalb der geotektonischen Stockwerke der Erde, die enge Beziehungen zueinander aufweisen und eine räumliche und zeitliche Entwicklungsfolge bilden.

## Kontinentalverschiebung, eine kühne Vorstellung

Mehrfach haben wir von Alfred Wegener und seinen nun 70 Jahre alten, umwälzenden Gedanken gehört. In gebotener Kürze wollen wir sie darlegen. Wie schon anderen vor ihm war Wegener beim Betrachten der Karten in Andrees Handatlas aufgefallen, daß die einander gegenüberliegenden Küsten Afrikas und Südamerikas zusammenpassen, vor allem auch die vorspringende nordöstliche Ecke von Südamerika und die Einbuchtung des Golfes von Guinea im westlichen Afrika. Das hatte schon die Aufmerksamkeit von Pickering (1907) und anderen erregt. Pickering erklärte diese Erscheinung durch Wegdriften Amerikas und hielt die Festländer für zerrissene Massen. Vor Wegener hatte bereits der Amerikaner F. B. Taylor von »wandernden Kontinenten« gesprochen, freilich ohne daß er seine Vorstellungen zu einer Hypothese ausgebaut hätte.

Vielfach wird in der Literatur bis in die jüngste Zeit angeführt, daß schon der britische Staatsmann und Philosoph F. Bacon im Jahre 1620 und andere Gelehrte des 17. und 18. Jahrhunderts Gedanken über eine mögliche Kontinentaldrift geäußert hätten. Bei genauer Überprüfung ist bei Bacon aber nichts dergleichen zu finden (N. A. Rupkë 1970). Wegener selbst führt im Rahmen von historischen Bemerkungen zu seiner Verschiebungshypothese Bacon nicht mit an. Als Grönlandforscher hatte er beobachtet, wie sich riesige Eisschollen vom Inlandeis loslösten und als Eisberge hinaus aufs Meer trieben. Warum sollten Großschollen der Erde nicht ebenso zerbrechen und driften? Er schloß, daß Afrika und Amerika früher einmal zusammengehangen haben müßten, und versuchte, anhand umfangreicher Literaturstudien Beweise für seine kühne Idee zusammenzutragen. Daß er sich als Geophysiker dabei nicht auf seine eigenen Fachgebiete wie Meteorologie und Ozeanographie beschränkte, sondern auch geologische, paläontologische und biologische Schriften studierte, weist ihn als vielseitigen Forscher aus. Förmlich besessen von seinen Gedanken, suchte er ständig nach neuen Beweisen und Zusammenhängen. Wie Südamerika und Afrika, so schienen ihm auch andere Erdteile zusam-



Der große Südkontinent Gondwanien mit der Antarktis im Zentrum (nach Craddock 1977). 1 – Anden-Orogen; 2 – Sierra-Orogen; 3 – Kap-Orogen; 4 – Ellsworth-Orogen; 5 – Ross-Orogen; 6 – Borchgrevink-Orogen; 7 – Adelaide-Orogen; 8 – Tasmanisches Orogen (Orogen: Gebirge, Gebirgseinheit)

menzupassen. Er zeichnete Weltkarten und gelangte zu der Überzeugung, daß bis vor 300 Jahrmillionen alle heutigen Einzelkontinente in einem riesigen Superkontinent vereinigt gewesen wären. Atlantik und Indik hätten damals noch nicht existiert. Wie in einem Puzzlespiel setzte er die heutigen Festländer zu einem einheitlichen Großkontinent zusammen, den er Ganzerde oder *Pangaea* nannte. Neben der *Pangaea*, die rund ein Drittel der Erdoberfläche umfaßte, habe es einen einzigen großen Ozean gegeben, die *Panthalassa*. Vor 250 Millionen Jahren, im Permokarbon, und seit 150 Millionen Jahren an der Wende Jura/Kreide verstärkt, sei der Superkontinent bis heute unaufhörlich zerbrochen. Die jetzigen Einzelkontinente hätten sich losgelöst. Erst vor einer oder einer halben Million Jahren hätten sich bei gesteigerten Verschiebungsbeträgen seit dem Alttertiär Kanada, Grönland und Skandinavien abgesondert. In langen Zeiträumen hätten sich Kontinentalschollen über Tausende von Kilometern verschoben. Zunächst hätten ein großer Nordkontinent,

*Laurasia*, und ein riesiger Südkontinent, *Gondwania*, bestanden. »Bisher«, meint Wegener, »hat man das Auseinanderziehen einer großen Bruchspalte ignoriert!« In drei Rekonstruktionen von Erdkarten in zwei unterschiedlichen Projektionen für das Oberkarbon (vor rund 320 Millionen Jahren), das Alttertiär (vor rund 60 Jahrmillionen) und das Altquartär (vor etwa 1,5 Millionen Jahren) hat Wegener versucht, seine Ideen anschaulich zu machen (siehe Abb. auf S. 8). Der durch den Atlantik von Nord nach Süd ziehende Mittelatlantische Rücken sei ein zurückgebliebenes Stück der Pangaea – und hier irrte Wegener! Er stellte sich vor, daß die festländischen, um 35 km dicken Sialschollen (heute Lithosphäre) auf dem dichteren, zähflüssigen Sima (heute Asthenosphäre) des Untergrundes aktiv schwimmen, wie die Eisschollen oder Eisberge im Meerwasser. Hier irrte Wegener wieder, wobei man ihm zugute halten sollte, daß zu seiner Zeit kaum Kenntnisse – bis auf die 1909 entdeckte Moho-Diskontinuität – über den tieferen Untergrund und die Ozeanböden vorhanden waren. »Die Kräfte, die die Kontinente verschieben, sind dieselben, welche die großen Faltengebirge erzeugen«, schrieb er 1929. So sollten sich die nordamerikanischen Gebirgsketten und die südamerikanischen Anden durch Druck bei der Westdrift der amerikanischen Festlandsscholle gegen den Pazifischen Ozean am Außenrand des Blocks gebildet haben, gleich einer steinernen Bugwelle. Die Faltengebirgsgürtel im südlichen Europa wären in Zusammenhang mit der Polflucht des Nordkontinents *Laurasia* und der Bewegung des Südkontinents *Gondwania* gegen den Äquator dadurch entstanden, daß die mächtigen Sedimente des zwischen beiden Blöcken gelegenen Mittelmeeres gestaucht, aufgefaltet und zusammengeschoben worden seien, nicht anders als der Himalaja und andere zentralasiatische junge Gebirgsketten durch das nach Norden drängende Indien.

Wegener glaubte, daß sich der Abstand von Grönland zu Europa um 30 m im Jahr vergrößern müßte. Dänische astronomische Ortsbestimmungen ergaben sogar einen Wert von 36 m, der aber falsch war. Wir wissen heute, daß auf der Grundlage solcher Längenmessungen keine exak-

ten Werte berechnet werden können. Die Verschiebungen sind weit geringer und liegen im Zentimeterbereich.

Für Wegener waren der Antrieb für die Drift die Polfluchtkraft in Richtung auf den Äquator infolge der Wirksamkeit gravitativer und die Westdrift der Kontinente auf Grund von Trägheitskräften, die mit der Erdrotation zusammenhängen, da die Gezeiten die Erdrotation bremsen und die Großschollen daher nach Westen driften. Diese Kräfte brauchten trotz ihrer geringen Wirkung nur über



 basaltischer Magmatismus im ältesten Jura

 Gletscherdrift (permokarbonische Eiszeit)

 präkambrische Strukturen

Jahrmillionen aktiv zu sein, um die kontinentale Drift zu verursachen. Seinen Argumenten konnten andere Geophysiker ebensowenig folgen wie den Vorstellungen über den Driftmechanismus. Ja, der englische Geophysiker H. Jeffreys konnte Wegeners Polfluchtkraft und Gezeitenreibung mathematisch widerlegen. Auch hier täuschte sich also Wegener.

Ähnliche und gleiche Strukturen innerhalb der Kontinente, dieselben Spuren einer großen Eiszeit an der Wende Karbon/Perm in den Südkontinenten, gleiche Lagerstätten von Diamanten, Edelsteinen wie Turmalinen, Beryll oder Topas und Erzen, dieselben fossilen Tiere und Pflanzen und viele andere Übereinstimmungen auf beiden Seiten des Atlantiks ließen die Frage nach dem Wie und Warum in der Folgezeit niemals ganz verstummen, auch wenn Wegeners Versuch, weitere exakte Beweise für die Drift zu finden, mehrfach scheiterte. So diskutierte er die Möglichkeit einer Polwanderung, schloß sie zwar nicht ganz aus, hielt sie aber für nebensächlich. Er meinte, es wäre unwahrscheinlich, daß sich im Verlauf der Erdgeschichte die Klimazonen verschoben hätten, im Gegenteil, es wären »vielmehr die Kontinente, die ihre Lage verändert« hätten.

Doch auch heute sollte man sich darüber im klaren sein, daß niemals eine Begründung für sich allein genügend Beweiskraft für die Kontinentalverschiebung besitzen kann. Wegener hat auch bereits mögliche Konvektionsströme innerhalb der zähplastischen Erdschalen als die Drift in Gang bringende Kraft diskutiert.

Es ist tragisch, daß Wegener als überzeugter Verfechter der Drifthypothese nicht erleben durfte, wie viele Teile seiner Vorstellungen sich in den letzten beiden Jahrzehnten als zutreffend erwiesen haben. »Vom falschen Ansatz zur richtigen Theorie« (besser wäre »Hypothese«), meint etwas überspitzt W. Kertz.

*Paläotektonische Zusammenhänge zwischen Afrika und Südamerika  
(nach einem Entwurf von Illies)*

---

# Von der Kontinentalverschiebung zur Plattentektonik

---

## Vom Bau der Kontinente

Über 150 Jahre hat sich die Geologie mit dem Bau und der erdgeschichtlichen Entwicklung der Kontinente beschäftigt und dabei große Fortschritte erzielt. Ein Blick auf eine geologische Weltkarte läßt die wichtigsten Bautypen der Lithosphäre erkennen. Da sind einmal die alten stabilen Festlandkerne, die am weitesten verbreitet und aus präkambrischen, metamorphen Gesteinskomplexen mit Graniten zusammengesetzt sind. Die Gesteine haben ein Alter von etwa einer Milliarde bis um 3 750 Millionen Jahren. Es sind tektonisch ruhige, recht einheitliche Gebilde, die man auch Kratone oder Kratogene<sup>1</sup> nennt. Sie bestehen aus den Alten Schilden, in denen das kristalline Grundgebirge des Präkambriums zutage tritt, z. B. im Baltischen, Kanadischen oder Australischen Schild, und dem randlich ungleichsinnig (diskordant) darübergelagerten, nichtgefalteten, sedimentären Deckgebirge der Tafel. Schild und Tafel bilden nach sowjetischen Geologen die Plattform, die in Teilstockwerke gegliedert wird wie die Osteuropäische, Ostsibirische oder Indische Plattform.

Im Gegensatz dazu stehen die großen Faltengebirge der Erde, die sich in verschiedenen Perioden der Erdgeschichte durch gebirgsbildende Bewegungen, Tektonogenesen, entwickelt haben. Neben weniger bedeutenden as-

<sup>1</sup> grch. kraton, starr, verfestigt; Kratone (Kratogene) sind also starre, verfestigte Teile der Erdkruste, die auf tektonische Beanspruchung nicht mehr mit starker Einengung (Faltung, Deckenüberschiebung), sondern nur noch mit Bruchbildung reagieren (Gegensatz: Orogene)

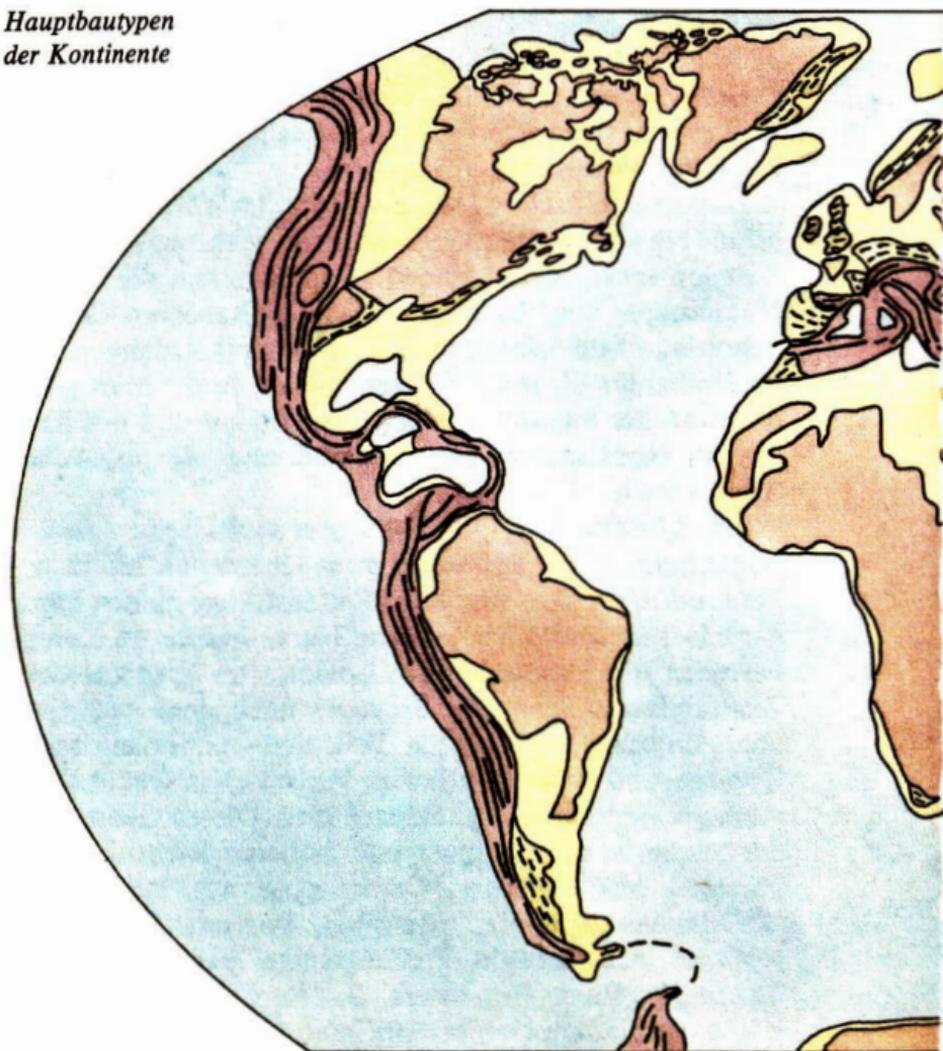
syntischen oder baikalischen Faltensträngen, die vor 1000 bis um 650 Millionen Jahren besonders in Sibirien, daneben auch in Mittel- und Westeuropa entstanden, sind es unter den alten Faltengebirgen die weit verbreiteten Kaledoniden und Varisziden.

Die kaledonische Tektonogenese ist vom Oberkambrium bis an die Wende Silur/Devon mehrphasig erfolgt. Kaledonischen Alters sind die Faltenzonen, die sich in Nordeuropa von Norwegen nach Spitzbergen, Wales, Schottland und Irland, aber auch in den Ardennen und im Brabanter Massiv verfolgen lassen. In Sibirien gehören dazu der Sajan, der Kuznezker Alatau und der Kunlun, in Nordamerika Neufundland und die nördlichen Appalachen.

Für Mitteleuropa ist die jüngere variszische Ära von Bedeutung, deren Faltungen vom Oberdevon bis in das Perm erfolgt sind. Variszische Faltenstränge ziehen durch ganz Eurasien und das östliche Nordamerika. In Europa bestehen die Varisziden aus einem vom Französischen Zentralplateau über die Bretagne nach dem südwestlichen England streichenden Teil, dem Armorikanischen Gebirge, und dem eigentlichen Variszischen Gebirge, das auch als Herzyniden bezeichnet wird. Dieses Gebirge, zu denen die in nordöstlicher und östlicher Richtung streichenden Mittelgebirge Mitteleuropas wie Rheinisches Schiefergebirge, Harz, Odenwald, Spessart, Kyffhäuser, Vogesen, Schwarzwald, Fichtelgebirge, Bayerischer Wald, Thüringer Wald, Erzgebirge, Sudeten, Mährisches Gesenke und andere Gebirgsteile gehören, läßt sich in mehrere durch Baustil und Gesteinsserien unterschiedliche Zonen gliedern. In Asien ist der Ural mit Nowaja-Semlja variszisch, und Gebirge gleichen Alters ziehen sich durch ganz Asien. Die Gebirge der Taimyr-Halbinsel sind ebenso variszischen Alters wie der Chingan und der Südtianschan. Der arktische Nordstamm setzt sich über das Beringmeer in variszischen Teilen der Rocky Mountains fort. Vor allem aber sind die Appalachen im östlichen Nordamerika im wesentlichen variszisch, und im östlichen Australien finden sich ebenfalls gleich alte Gebirge.

Mesozoische Faltengebirge mit gebirgsbildenden Prozessen im Oberen Jura bis zur Unteren Kreide sind das

*Hauptbautypen  
der Kontinente*

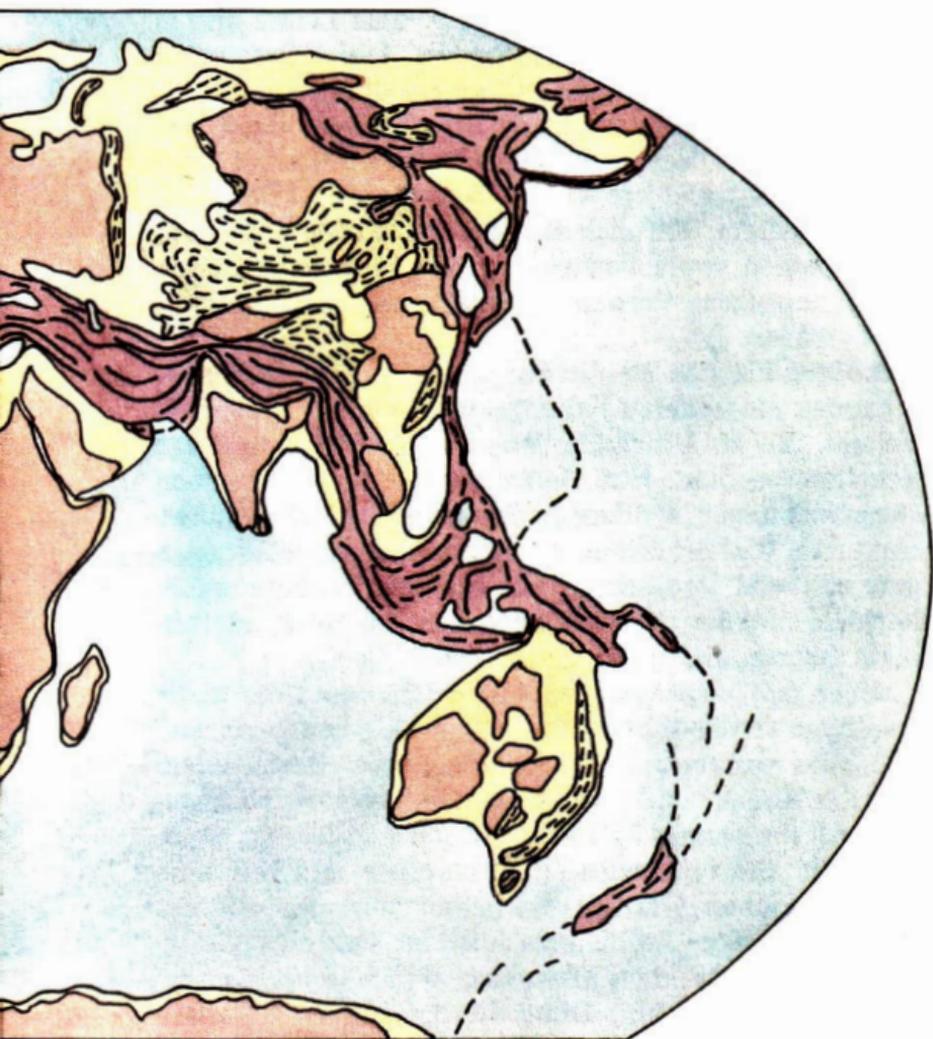


 Festlandskerne  
(Alte Schilde)

 Tafeln, große Becken und  
heutiger Schelf

Sibirische Werchojansker Gebirge, der Sichote-Alin und Gebirge im südlichen China (Jünnan), in Burma und auf der Halbinsel Malakka, die sich auf Kalimantan (Borneo) fortsetzen.

Viel bedeutender sind die jungen, alpidischen Falten- und Deckengebirge, die im wesentlichen im Tertiär entstanden sind. Zu ihnen zählen neben den Alpen als dem am besten untersuchten jungen Faltengebirge der Atlas,



 alte Faltengebirge

 junge Faltengebirge

die südspanischen Gebirgsketten, die Karpaten, Dinari-  
den, der Balkan und die Helleniden, der Kaukasus, El-  
brus, Hindukusch, Taurus, die Zagrosketten, der Karako-  
rum, Himalaja und Pamir. Tertiäre Faltengebirge  
umgürten Asien im Osten, wo die so auffälligen Inselgir-  
landen das Bild beherrschen. In Amerika ziehen junge  
Faltengebirge von Alaska bis nach Feuerland und von  
dort nach Antarktika. Alle diese Gebirge sind kompliziert

gebaut und im einzelnen zu verschiedenen Zeiten und in unterschiedlichen Akten entstanden. Die Bewegungen sind auch heute noch nicht völlig abgeklungen.

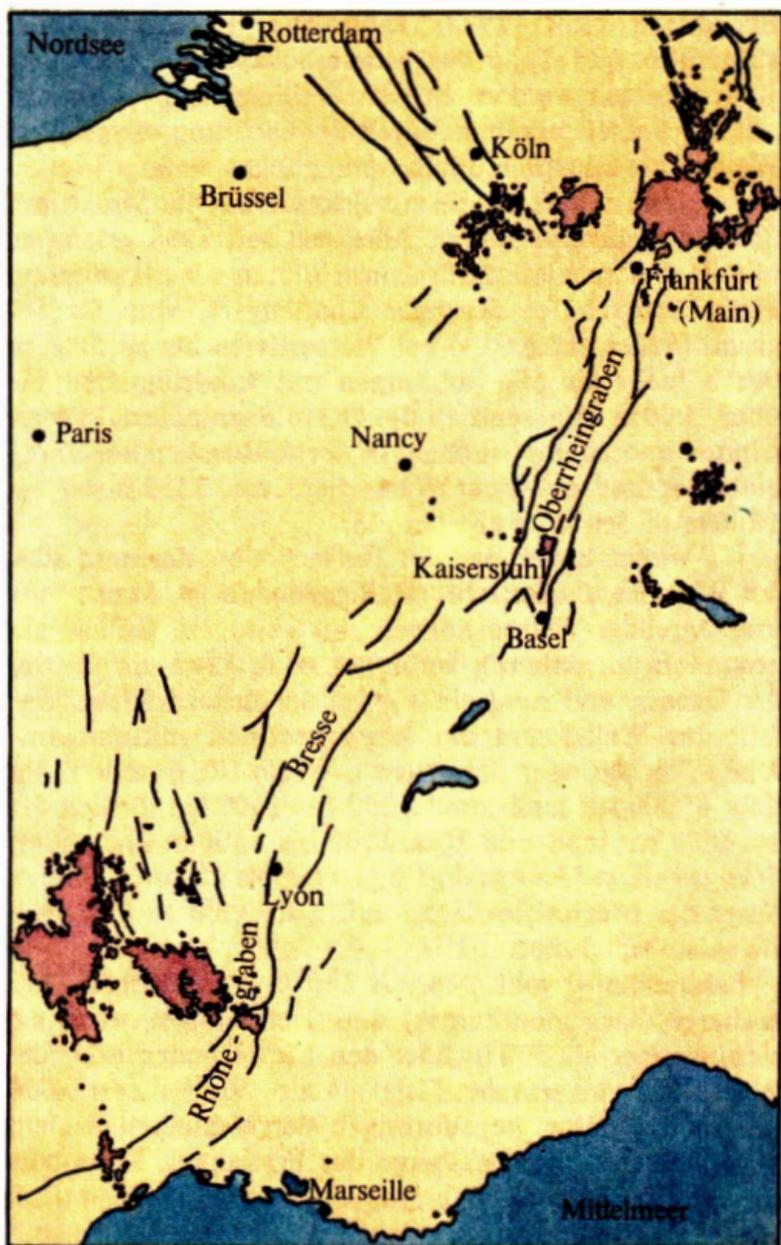
Eine Art Übergang zwischen den Faltegebirgen und anderen festländischen Bautypen bilden seltener, verwickelt gebaute Gebirge wie der Schweizer und Französische Faltenjura, die sich aus breiten Kofferfalten und Koffermulden sowie beckenartigen, ungefalteten Teilen zusammensetzen. Verwandte Strukturen findet man in den Pyrenäen.

Größere Flächen als die im ganzen auf schmale Krustenzonen eingeengten Faltegebirge nehmen Krustentypen ein, die als Bruchschollen- und Bruchfaltegebirge bezeichnet werden. Hier finden sich weder Falten noch Überschiebungen, sondern große und breite Ausweitungsstrukturen wie Brüche und beulenartige Aufwölbungen ohne seitliche Verkürzung wie bei den Faltegebirgen. Beispiele sind die kleinen Gebirge am Harzrand, im Thüringer Becken und in Niedersachsen.

Neben den jungen Faltegebirgen fallen im Erdbild die gewaltigen festländischen Bruch- und Grabenzonen auf, z. B. das vorderasiatisch-ostafrikanische Bruchsystem oder der Rhône- und Oberrheingraben, die oft alt angelegt sind, ihr jetziges Bild aber erst seit dem Tertiär erhalten haben. Sie zeichnen sich durch einen weit verbreiteten basaltischen Grabenvulkanismus aus, der aus der Tiefe des obersten Erdmantels aufsteigt. Daß diese Strukturen auch heute noch aktiv sind, darauf weisen insbesondere Erdbeben hin. Diese Großgräben oder Tiefenbrüche durchziehen die Lithosphäre unabhängig von Gesteinskomplexen, Tektonik und erdgeschichtlicher Entwicklung der Krustenteile. Wir werden sie in ihrer Verbreitung und Bedeutung erst verstehen, wenn wir die Geschichte der Ozeanböden dargestellt haben.

## Vorstoß zu den Ozeanböden

Im Gegensatz zu den Festländern war der Meeresboden bis vor wenigen Jahrzehnten fast unbekannt. Mit Hilfe des Echolots konnten im Südatlantik durch die Meteor-



*Der zentrale Abschnitt einer Kette junger Gräben in Westeuropa ist der Oberrheingraben. Das Grabengeschehen wurde seit dem Alttertiär von einem starken Vulkanismus (rötlich) begleitet (nach Illies 1970).*

Expedition (1925–1928) zahlreiche Tiefenmessungen ausgeführt und Teile des Meeresbodens kartographisch aufgenommen werden. In den dreißiger Jahren begann mit der Seeseismik, d. h. durch Beobachtung seismischer Wellen, die künstlich durch Sprengungen erzeugt worden waren, eine neue Zeit, die zur Erforschung der Strukturen des Meeresbodens führte. Aber erst seit 1968 gelang es mittels des speziell dafür konstruierten amerikanischen Tiefseebohrschiffes »Glomar Challenger«, vom Ozeangrund (außer der Arktis) bei Wassertiefen bis zu 5000 m durch mehr als 500 Bohrungen mit Eindringtiefen bis über 1000 m insgesamt an die 70 km Kernmaterial zu gewinnen und zu untersuchen. In der Arabischen See drang eine Bohrung bei einer Wassertiefe von 3539 m bis zu 1300 m in den Ozeanboden ein.

Wir wissen heute, daß der Tiefseeboden, der rund 80% der Weltmeere ausmacht, reich gegliedert ist. Man kennt umfangreiche Tiefsee-Ebenen mit geringem Relief, die besonders im Atlantik verbreitet sind. Etwa ein Drittel der Ozeane und rund ein Viertel der Erdoberfläche umfaßt das Weltsystem der langgestreckten mittelozeanischen Rücken oder Schwellen (»World rift system«), die über 65000 km lang, rund 1200 bis 1500 km, örtlich bis zu 4000 km breit und etwa 2500 bis 3500 m hoch sind. Wie gewaltige Gebirgszüge ragen sie bis zu rund 1000 m unter der Meeresoberfläche auf. Zum größten Teil sind sie seismisch äußerst aktiv.

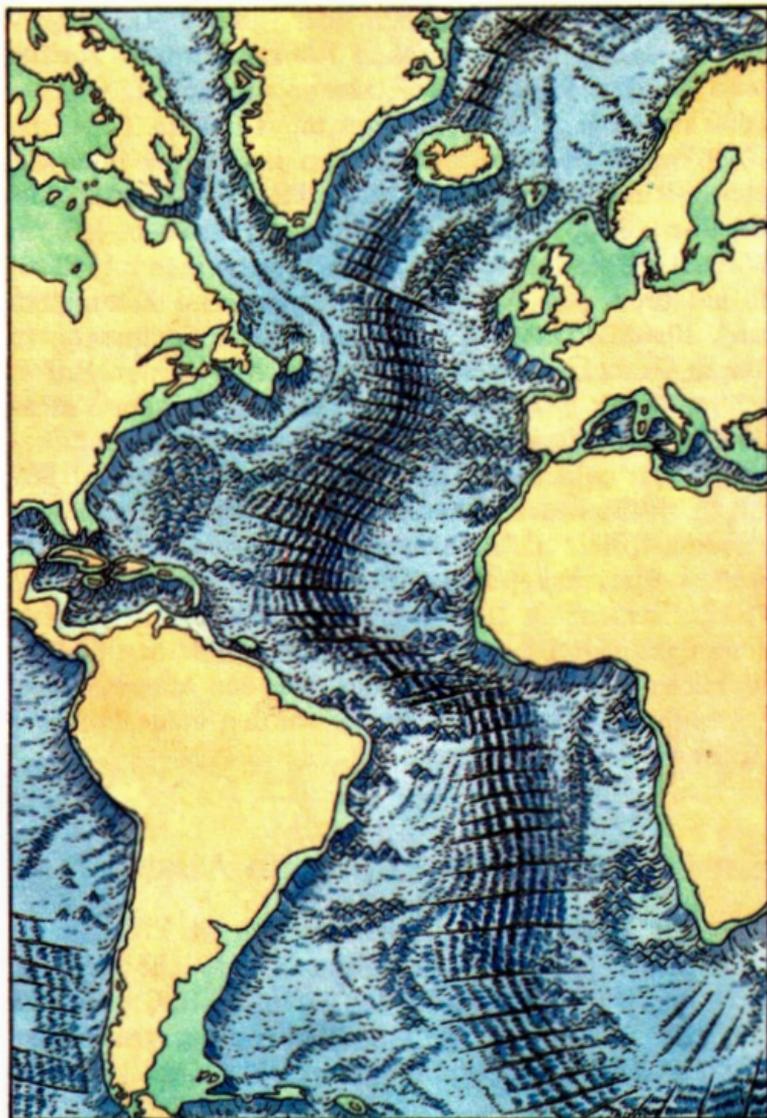
Zahlreiche – wohl mehr als 20000 – basaltische Tiefseeberge (»sea mountains«) und Tiefseehügel, wenn sie sich weniger als 500 m über den Meeresboden erheben, weisen auf vulkanische Tätigkeit hin. Viele dieser 3000 bis 4000 m hohen kegelförmigen Berge erscheinen oben abgeflacht wie die Tafelberge des Festlandes. Besonders im Pazifik finden sie sich gruppenweise. Sie heißen nach einem amerikanischen Geologen Guyots. Nach Hess sind es alte Schichtvulkane, deren Gipfelfläche über den Meeresspiegel aufragte, später durch Brandungs- und Strömungswellen eingeebnet wurde und die schließlich abgesunken sind.

Die tiefsten Teile der Ozeanböden, vor allem im Pazifik, sind die im Querschnitt V-förmigen, asymmetrischen

Tiefseegesenke, Tiefseerinnen oder -gräben. Im Gegensatz zu den mittelozeanischen Rücken sind sie vorwiegend an den Rändern der Ozeane entwickelt, wie der 2000 km lange Marianengraben mit 11030 m Tiefe, der 6000 km lange Peru-Chile-Graben im Pazifik oder das Puerto-Rico-Gesenke mit 9220 m Tiefe im Atlantik. Tiefen über 10000 m finden sich nur im Pazifik. In 6000 m Wassertiefe sind diese Gebilde im allgemeinen um 50 bis 60 km breit und bis zu mehreren tausend Kilometern lang. Bisweilen enthält ihre ebene Sohle Sedimente. In diesen Gesenken treten die meisten und tiefsten Erdbebenherde auf; dazu kommt ein kennzeichnender Vulkanismus. Der Franzose Jacques Picard und der US-amerikanische Marineleutnant Don Walsh haben im Januar 1960 mit ihrem Bathyscaph »Trieste«, einer stählernen, besonders konstruierten Tauchkapsel, im nur wenige Kilometer breiten Marianengraben 10916 m Tiefe erreicht, eine Tiefe, die mehr als 2000 m größer ist, als sich der Tschomolungma (Mt. Everest) im Himalaja mit seinen 8848 m als höchster Berg des Festlandes über den Meeresspiegel des Indischen Ozeans erhebt. So wurden beide Forscher zu Inhabern eines Weltrekords!

## Ein Gebirgsrücken mitten im Atlantik

Von dem bedeutenden Ozeanographen M. Ewing, dem Leiter des Lamont-Observatoriums in der Nähe von New York, hatte im Jahre 1952 der 28jährige B. Ch. Heezen (der 1977 auf See den Tod fand) den Auftrag erhalten, im Atlantik Erdbebenzentren kartographisch zu erfassen. Dabei sollte ihn M. Tharp unterstützen und das Relief des Meeresbodens im Atlantik kartieren. Das Ergebnis überraschte: Trotz unzureichender Unterlagen zeichnete sich mitten im Atlantik eine Schwelle ab. Und noch etwas, dieser Gebirgsrücken zeigte auf seinem höchsten Grat eine tiefe Spalte, eine Schlucht. 90% der Erdbeben mit flachen Herden lagen genau in diesem Scheitelgraben. Heezen wollte das zunächst nicht glauben, aber man stellte fest, daß die so gefürchteten Kabelbrüche gerade dort auftraten. In diesem tiefen und schmalen Grabenbe-



*Die Gliederung des Meeresbodens im Atlantik*

reich, einem Rift, wurde weiter ein aktiver Basaltvulkanismus entdeckt. Wärmestrommessungen ließen hier weit höhere Werte als in Richtung auf die Flanken des Rückens erkennen. Rund ein Fünftel der von der Erde abgegebenen Gesamtwärme ist in diesen Regionen konzentriert. Von Island im Norden bis zur südatlantischen

Insel Tristan da Cunha zieht sich dieser Rücken, verläuft dann in einem Bogen um das Kap der Guten Hoffnung in den Indik und durch den Golf von Aden.

Heezen, von der Richtigkeit der Tharpschen Entdeckung überzeugt, schlug seinem Chef Ewing vor, den gesamten Ozeanboden mittels Echolotung und seismischer Methoden näher zu untersuchen. Das Ergebnis war verblüffend: Die Rücken mit ihren zentralen Spalten ziehen sich durch alle Weltmeere. So ist es im südlichen Indik der westliche Indische Rücken mit einem Ast nach Norden, dem Carlsberg-Rücken, der mit dem Golf von Aden und dem Roten Meer verbunden ist, und mit einem südöstlichen Ast, dem östlichen Indischen Rücken, der sich im Bogen als Antarktischer Rücken um Australien und Neuseeland erstreckt, um sich als Ostpazifischer Rücken im südöstlichen Pazifik fortzusetzen und im Raum von Niederkalifornien das amerikanische Festland zu erreichen. Immer wieder läßt sich der große und tiefe Scheitelgraben der Kammregion nachweisen; nur im Pazifik fehlt er.

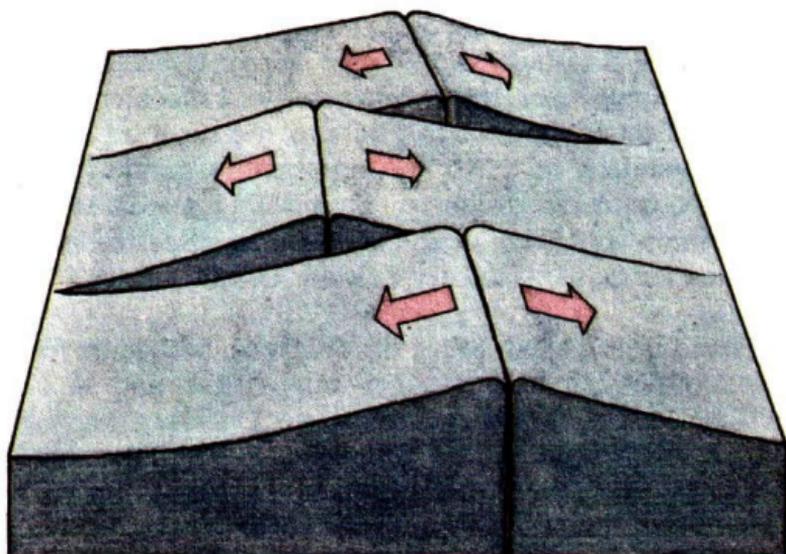
Freilich darf man sich so ein Rift nicht als einen einzigen tiefen Graben vorstellen. Es handelt sich vielmehr um ein Grabensystem, ein Schollenmosaik, mit treppenartigen Brüchen in den seitlich abfallenden Flankenregionen. Die Höhe der einzelnen Stufen nimmt in Richtung auf die Tiefseebecken an den Rändern ab.

Im ganzen erkennt man meist zwei parallele, fast symmetrische Gebirgsketten. Das basaltische Magma aus der Tiefe quillt im zentralen Graben empor. Daß man vulkanische Ausbrüche am Boden der Tiefsee zuvor an der Meeresoberfläche nicht beobachtet hat, hängt damit zusammen, daß bereits bei rund 2000 m Tiefe der kritische Druck des Wassers durch den hydrostatischen Druck überschritten wird, so daß keine Dampfexplosionen möglich sind und nichts zu bemerken ist (Rittmann 1981). Die Scheitelgräben oder *Rifte* sind 12 bis um 50 km breit und 1000 bis 2500 m tief. An zahlreichen Stellen sind die Rücken in unregelmäßigen Abständen durch Querelemente seitlich gegeneinander versetzt, die etwa rechtwinklig zur Kammregion, also West-Ost im Atlantik, und im Pazifik fast parallel zu den Breitenkreisen verlau-



*Die größten Tiefenbruchsysteme der Erde ziehen sich im Nordostpazifik in einem Abstand von rund 1 000 km entlang und enden an der amerikanischen Küste. Es sind alte Transformstörungen, die von einer Bewegung künden, die – anders als heute – die Pazifische Platte von der Amerikanischen entfernte.*

fen und Nordost–Südwest im Indik. Durch sie werden die Rücken in zahlreiche Einzelstücke unterteilt. Die Verschiebungsbeträge belaufen sich meist auf mehrere hundert Kilometer. Diese Verwerfungssysteme, an denen seitlich horizontale Ausgleichsbewegungen vor sich gehen, hat der kanadische Geologe T. Wilson (1965) *Transform- oder Wandlungsstörungen* genannt und sie unmittelbar mit dem Auseinanderdriften neugebildeter ozeanischer Kruste entlang den Zentralgräben der Rücken in Verbindung gebracht. Im nordöstlichen Pazifik an der nordamerikanischen Westküste sind es die gewaltigsten bisher bekannten Tiefenbrüche in Abständen von rund 1000 km, die Verschiebungen von rund 200 bis um 1200 km – der größte Wert, der je auf der Erde gemessen wurde – erkennen lassen (Mendocino-Bruchzone). Im



*Transformstörungen zwischen zwei Segmenten eines Rückens (nach Menard)*

westlichen Indik ist die Owen-Bruchzone 10000 km lang und ganz ähnlich ihr Gegenstück, die 90°-Ostzone. Diese Störungen sind zugleich horizontale Verschiebungen und vertikale Brüche.

Im ganzen ergibt sich ein faszinierendes Bild des Reliefs der Ozeanböden, auch wenn man die schöne Darstellung auf der Weltkarte als ein idealisiertes Schema ansehen muß.

## Island, Insel im Atlantischen Rücken

Es ist schwer, sich von den Vorgängen im Scheitelgraben des Mittelatlantischen Rückens eine klare Vorstellung zu machen, da alles unter dem Meeresspiegel geschieht. Die Natur kommt dem Forscher aber entgegen. In der Achse des Rückens erheben sich Inseln über den Meeresspiegel, die unmittelbare Beobachtungen erlauben: Jan Mayen, Island, die mit 102 828 km<sup>2</sup> größte Landmasse im gesamten Rücken, fast so groß wie die DDR, und nach Süden zu die Azoren, die Felsklippe St. Paul, die Inseln Ascen-

sion, St. Helena, Tristan da Cunha und die Bouvetinsel südlich von Kapstadt. Die Gruppe der winzigen St.-Paul-Inseln ist von besonderem Interesse, weil die hier anstehenden Gesteine nicht junge Basalte, wie sonst im Südatlantik, sondern in der Tiefe entstandene peridotitische Gesteine mit einem Alter von etwa 3 500 bis 4 500 Millionen Jahren sind. Man deutet sie als unverändertes Material des Erdmantels aus der Zeit der Öffnung eines Uratlantiks.

Island ist selbst ein Stück des Rückens, besteht zu 99% aus basaltischen Lavagesteinen und Tuffen und ist ein echtes Vulkangebirge. Nur dort, wo Dehnung herrscht und tiefe Spalten in der Lithosphäre vorhanden sind, kann das basaltische Magma des oberen Mantels die Oberfläche erreichen. Auch der 350 km lange, sich Nord-Süd erstreckende Scheitelgraben ist vorhanden, ein 1 000 bis 3 000 m tiefer und 25 bis 40 km breiter Zentralgraben mit zahlreichen Vulkanen, der zwei Kämmen mit steilen seitlichen Bruchstufen aufweist. Er wird von zwei Ost-West streichenden Querstörungen in einzelne Teile zerlegt, nicht anders, als die Transformstörungen das untermeerische Gebirge in seinem Nord-Süd-Verlauf unterteilen. Heute noch aktiv wie ehemals, hat sich der Graben im Jahre 1970 um 6 bis 7 cm erweitert. Seit Menschengedenken dringen basaltische Schmelzflüsse aus der Tiefe zur Oberfläche und vergrößern die Insel. Nach neuen thermischen Beobachtungen scheinen rund 6 km unterhalb der zentralen Bruchzone Islands ganz allgemein partiell geschmolzene Gesteinsmassen vorhanden zu sein (G. Palmason 1981). Viele Erdbeben mit flachen Herden kennzeichnen die Rückenachse auf der vulkanischen Insel, die zur Hälfte erst vor 9 bis 20 Millionen Jahren entstanden ist. In der Verlängerung der Zentralspalte stiegen 1963 etwa 10 km südwestlich von Island Dämpfe und Lockerprodukte (Tephra), später auch dünnflüssige Laven aus dem Meer auf und erreichten Höhen zwischen 1 800 und 3 000 m.

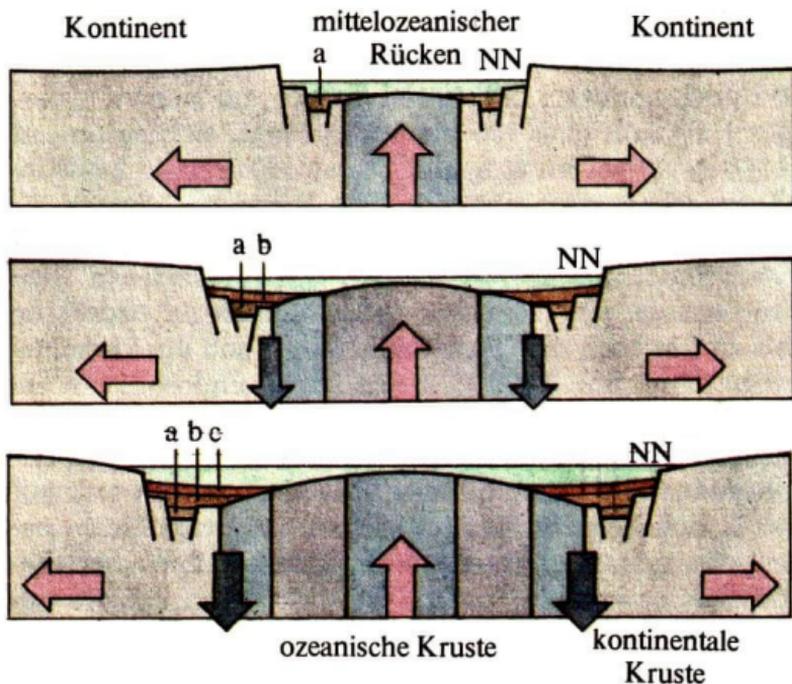
Bis 1967 hatten sich die neue Insel Surtsey und zwei Inselchen gebildet. Dann war zunächst alles vorüber. Im Januar 1973 wurde ein relativ schwaches Erdbeben beobachtet. Zwei Tage später öffnete sich 110 km südöstlich

der isländischen Hauptstadt Reykjavik in der Verlängerung des Rückens auf der Insel Heimaey, der größten der Westmännerinseln, 20 km von Surtsey, im Hang des Berges Helgakoll eine 300 bis 400 m lange, sich später auf 1500 m vergrößernde Spalte. 50 bis 150 m hohe Lavafontänen schossen oberhalb des für Island wichtigsten Fischereihafens Kirkjubär empor. Die 5500 Einwohner der Stadt mußten evakuiert werden. Die vulkanischen Auswurfmassen von insgesamt 250 Millionen m<sup>3</sup> bedeckten bis zu 5 m hoch die Dächer der Häuser und die Verkehrswege. Die um 1000°C heiße Lava und vulkanische Aschen erreichten das Hafenbecken. Durch die Berührung mit dem kalten Meerwasser kam es zu heftigen Explosionen und Dampfbildung. Das Meerwasser wurde auf 44°C aufgeheizt. Viele Spezialisten und deren Helfer bemühten sich, die Lava durch Besprühen mit Wasser zähflüssiger zu machen, weil die Gefahr bestand, daß die vulkanischen Massen die Hafeneinfahrt unbrauchbar machten, indem sie sie verschlossen. Im Juni war der Ausbruch beendet. 360 Häuser, etwa ein Drittel der Stadt, waren zerstört, die Hafeneinfahrt aber war zum Glück nur zum Teil abgeriegelt: Millionen Kubikmeter vulkanischer Auswurfmassen wurden abgetragen, und die Stadt konnte wieder besiedelt werden. Die Fläche der Insel hatte sich von 113 auf 135 km<sup>2</sup> vergrößert.

Ganz ähnlich verlief ein Ausbruch auf der Azoreninsel Fayal in den Jahren 1957/58.

## Ausbreitung des Meeresbodens

Nach Wegeners Vorstellungen wanderten die Kontinente aktiv in einer zähflüssigen Unterlage, die selbst passiv war. Aufbauend auf den Erkenntnissen von B. C. Heezen, M. Tharp und M. Ewing über das Weltsystem der mittelozeanischen Rücken, der Struktur und den Bauelementen des Ozeanbodens mit seinen Seebergen und Guyots, entwickelten H. Hess und R. S. Dietz um 1962 die Hypothese von der Ozeanbodenausweitung, dem »ocean (sea) floor spreading«. Gerade Hess hatte als äußerst vorsichtiger und kritischer Geologe zunächst an manchen neuen



*Die Entstehung eines Ozeans nach der Vorstellung der Ozeanbodenausweitung (nach Seibold 1973).*

*Stadium a: An einem divergenten Plattenrand dringt basaltisches Mantelmaterial nach oben und hebt die kontinentale Kruste rückenförmig heraus.*

*Stadium b: Durch weiteres Aufdringen von Mantelmaterial unter den Rücken wird laufend ozeanische Kruste produziert, so daß das Ozeanbecken breiter wird. Randteile der kontinentalen Kruste brechen in Blöcken ein.*

*Stadium c: Mit zunehmendem Alter kühlen sich die randlichen Teile ab. Unmittelbar über den Basalten werden Sedimente (a, b, c) abgelagert, die wie die Basalte landwärts älter (und mächtiger) werden. Solche Kontinenteränder des »atlantischen« Typs sind also begrabene divergente Plattenränder.*

Erkenntnissen gezweifelt. Nichts ist für ihn bezeichnender, als daß er 1962 seine neuen Ideen in einem Aufsatz als einen »Essay zur Geopoesie« betrachtete. M. Ewing hatte gezeigt, daß die Sedimente am Ozeanboden geringmächtig sind, höchstens um 100 m, meist wesentlich weniger, und im Zentralbereich der Rücken gänzlich fehlen. Zudem sind diese Sedimente durchweg jung, nicht an-

ders als die darunter lagernden basaltischen Laven. Die ältesten Sedimente und Basalte liegen am weitesten von der Zentralspalte entfernt und werden immer jünger, je mehr man sich den Rücken nähert.

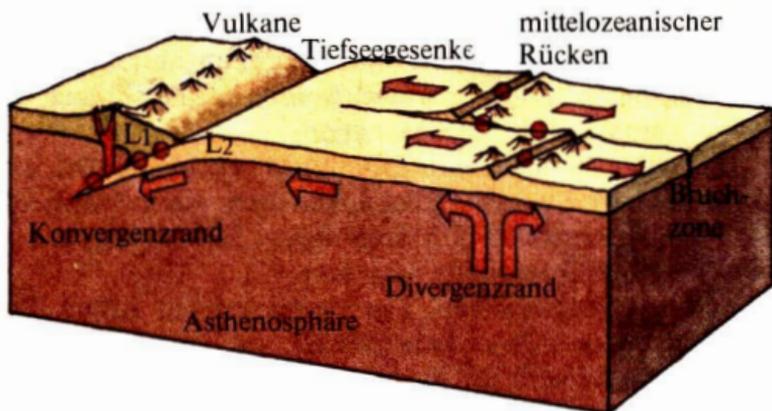
Im Atlantik sind alle Bildungen küstenparallel zu Amerika bzw. Europa/Afrika angeordnet. Kein Sediment ist älter als rund 200 Millionen Jahre: Demzufolge müssen die Ozeane ebenfalls jung sein.

In den Scheitelgräben, den tiefreichenden Riften der Rücken, drängen zwar nicht überall, sondern mannigfach versetzt im Bereich der einzelnen Bänder der Transformstörungen aus rund 12 bis 14 km Tiefe basaltische Schmelzflüsse mit Geschwindigkeiten von etwa 1 mm im Jahr nach oben, die von Konvektionsströmungen im Erdmantel angetrieben werden. Neben diesen Prozessen am Ozeanboden spielen sich dazugehörige Vorgänge darunter, in der Tiefe des Mantels, ab. Durch die emporsteigenden Laven wird die ozeanische Kruste laufend stark asymmetrisch nach beiden Seiten der Rücken weggeschoben. Die erstarrten Schmelzflüsse werden in entgegengesetzte Richtungen verfrachtet. Die ozeanische Kruste ist sozusagen in der Dehnungszone der Rücken aufgebeult. Darauf deutet auch der erhöhte Wärmefluß hin. Die Laven erstarren infolge Wärmeabgabe an das kühle Meerwasser. Ständig wird örtlich neues Mantelmaterial aus der Tiefe nach oben gebracht, so daß sich laufend ozeanische Kruste bildet. Die Gesamtproduktion an neuer ozeanischer Kruste wird jährlich auf wenigstens 2,5, vielleicht auch auf 3,4 km<sup>3</sup> geschätzt.

Erst seit Beginn der geologischen Neuzeit vor 65 Millionen Jahren scheint die Hälfte des derzeitigen Ozeanbodens entstanden zu sein oder, anders ausgedrückt, rund ein Drittel der heutigen Erdoberfläche. Und diese Prozesse laufen noch gegenwärtig unabhängig von menschlichen Einflüssen ebenso ab wie vordem.

Bei neuen meereskundlichen Untersuchungen ist es gelungen, ganz junge Spalten am Ozeanboden zu entdecken, wie die 300 km lange und 1,5 km breite Gloriaverwerfung zwischen Gibraltar und den Azoren.

Die horizontale Spreizung war im Laufe der Erdgeschichte unterschiedlich und liegt gegenwärtig bei etwa



Schematisches Blockbild zur Plattentektonik. Die Lithosphärenplatten driften über der zähflüssigen Asthenosphäre. Ihre Ränder sind seismisch und vulkanisch aktiv. Unter den divergierenden Rändern der mittelozeanischen Rücken wird neue ozeanische Kruste gebildet. Unter den konvergierenden Rändern der Tiefseegesenke wird die ozeanische Kruste in Subduktionszonen in die Tiefe transportiert und aufgeschmolzen. Es entsteht dabei zum Teil kontinentale Kruste.  $L_1$  – Lithosphäre mit kontinentaler Kruste;  $L_2$  – Lithosphäre mit ozeanischer Kruste. Die Kreise kennzeichnen Erdbebenzentren (nach Isacks, Oliver, Sykes 1968).

1 cm jährlich im Nordatlantik, um reichlich 2 cm im Südatlantik, bis zu 6 cm im Indik und um 5 bis 6, zum Teil um 8 bis 10 cm im zentralen Pazifik, in der Nähe der Osterinsel sogar 18 cm.

Im Gegensatz zu Wegeners Hypothese kommt den sich nach beiden Seiten verschiebenden Krustenschollen kein aktiver, sondern ein passiver Charakter zu: Sie schwimmen nicht selbst, sondern werden passiv mitgezogen und verfrachtet. Daß diese Schollendrift, die zu einer immer weiteren Entfernung der Großschollen voneinander führt, nicht ohne größere Erschütterungen vor sich gehen kann – dafür sind die vielen flachen Erdbeben ein Hinweis, die sich in der Kammregion der Rücken so auffällig häufen.

»Also doch Expansion der Erde?« wird mancher fragen. Mit einem klaren »Nein« dürfen wir antworten; denn der Raumgewinn im Bereich der Riffe wird an anderen Stellen der Erde durch Verschluckung von Lithosphäre

oder *Subduktion* ausgeglichen. Wie sich die ozeanischen Räume durch Ausweitung des Meeresbodens öffnen und erweitern, wird dieser Vorgang durch das Schließen ozeanischer Räume in anderen Bereichen ausgeglichen. Es gibt keine Hinweise dafür, daß die Erde größer wird.

## Tiefe Brüche und Gräben im Antlitz der Kontinente

Die bekannteste, bis in den Mantel reichende Störungszone auf der Erde bildet das im großen etwa Nord-Süd verlaufende vorderasiatisch-afrikanische Grabensystem.

Was wird in geologischem Sinne als ein Graben bezeichnet? Es ist eine durch Zerrung entstandene Bruchstruktur, in die ein länglicher, keilförmiger Körper zwischen stehengebliebenen oder gehobenen Schollen an mehr oder weniger parallelen Brüchen (Verwerfungen) eingesunken ist. Erich Krenkel (1922) hat die Entstehung solch großer und tiefer Grabenstrukturen als *Taphrogenese* bezeichnet.

Vom südlichen Rand des Taurusgebirges in Syrien zieht die globale Tiefenbruchzone über die Bekaa-Ebene, den Jordan- und Palästina-Graben mit dem Tiberiassee (See Genesareth) und dem Toten Meer zum Golf von Akaba, dann durch den 200 km breiten Rotes-Meer-Graben über die Bruchzone Äthiopiens nach Ostafrika, wo eine Reihe Einzelgräben und Grabensysteme mit Vulkanen wie dem Kilimandscharo und wassererfüllte Grabenseen wie der Mobutu-Sese-Seko-See (Albertsee), Tanganjikasee, Malawisee (Njassasee) und andere den Verlauf kennzeichnen. Weiter südlich gehören der Great-Dyke (Simbabwe) und das erzeiche Bushveld-Massiv (Südafrika) zum Ostafrikanischen Grabensystem. Die Bruchzone, die vom Roten Meer bis zum Sambesi über 4000 km lang ist, verliert sich auf der Breite von Madagaskar und setzt sich dann im Indischen Ozean fort. Die gehobenen Ränder der Schollen weisen Sprunghöhen von mehreren tausend Metern auf.

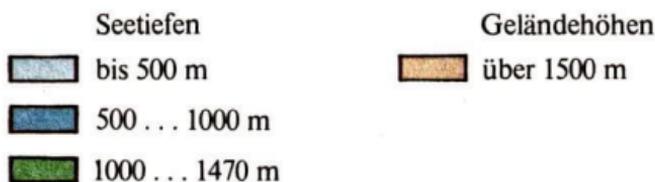
Mit einer Reihe Versetzungen erreicht das Grabensystem über das nördliche Afrika in Libyen und von dort

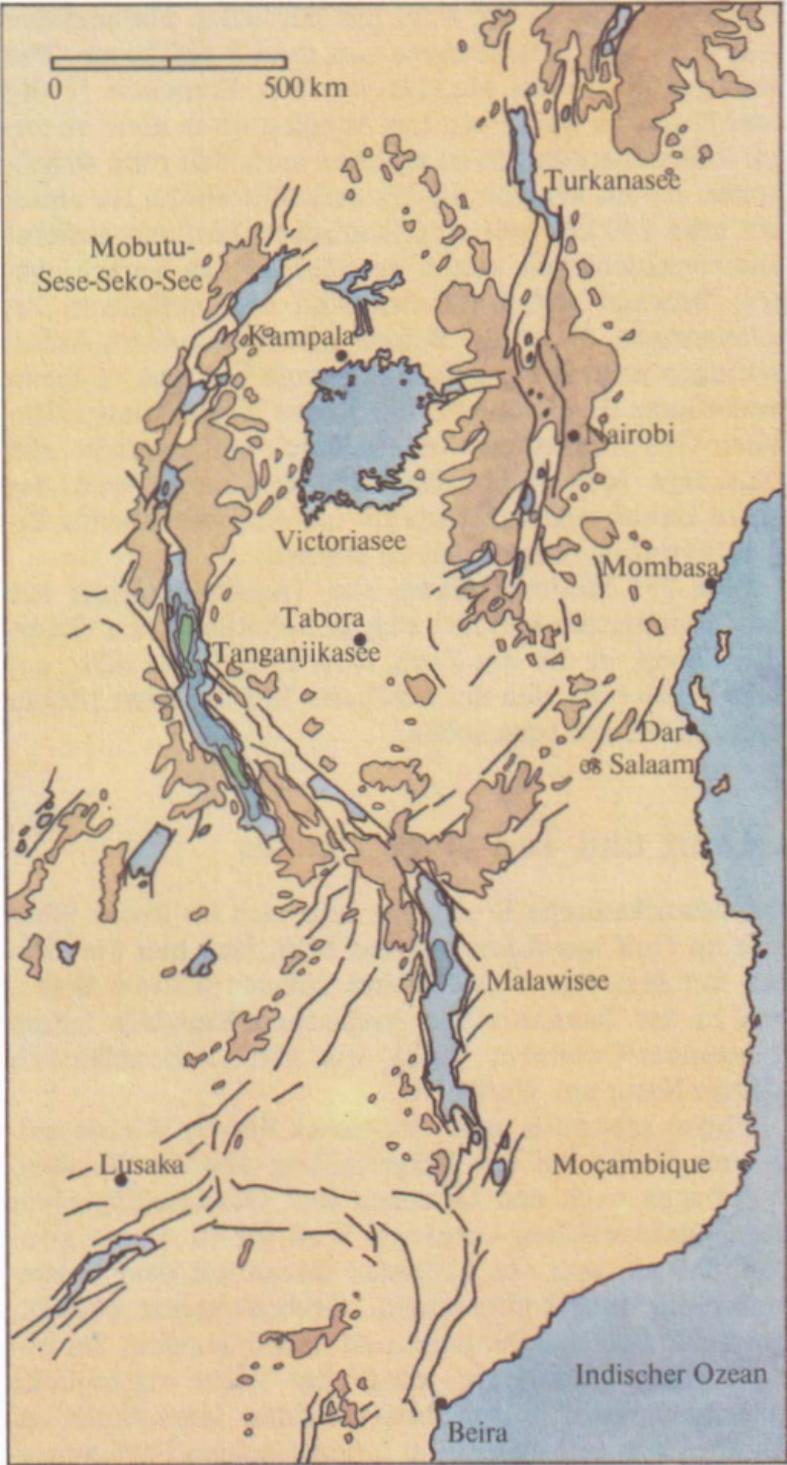
über Malta, Pantelleria, Sardinien und westlich von Korsika den Rhônegraben im südlichen Frankreich und setzt sich weiter nördlich im Bresse- und Limagnegraben fort. 150 km östlich davon zieht die 30 bis 36 km breite, tiefe Zerrspalte des Oberrheingrabens (siehe Abb. auf S. 39) zwischen Schwarzwald und Vogesen mit 300 km Länge von Basel bis nach Frankfurt (Main) und von da bis in die Nordsee und nach Skandinavien. Im Gesamtverlauf des Grabens kommt es immer wieder zu Erdbeben. So wurde die Stadt Basel im Jahre 1356 fast völlig zerstört, und auch in den letzten Jahren waren im Oberrheingebiet wiederholt erhebliche Bebenshäden zu verzeichnen.

Ein anderes kontinentales Tiefenbruchsystem ist das 70 km breite, rund 1000 km lange, kompliziert gebaute Baikalf Rift Sibiriens, das tiefste, sich jährlich um 2 cm erweiternde intrakontinentale Riftsystem der Erde überhaupt. Der Grund des Baikalsees liegt rund 1000 m unterhalb des Meeresspiegels.

Erwähnt seien weiter das ebenso lange chilenische Längstal in Südamerika, die nordanatolische, erdbebenreiche Horizontalverschiebung in Kleinasien und nicht zuletzt die bekannte, mehr als 1000 km lange San-Andreas-Fault nördlich des Golfes von Kalifornien, die sich, südlich von San Francisco aus dem Meer kommend, auf dem Festland fortsetzt. Hier haben wir ein eindrucksvolles System von Scherstörungen vor uns, eine große Transformstörung, die in nördlicher Richtung ins Meer hinauszieht und vermutlich an einem ozeanischen Rücken endet. An der Grenze der Nordpazifischen und Nordamerikanischen Großscholle gelegen, gehen hier seit etwa 60 Millionen Jahren bis auf den heutigen Tag kompli-

*Das Ostafrikanische Grabensystem (nach Illies 1970) mit den Hauptgräben (Striche), den Geländehöhen und den Seetiefen*





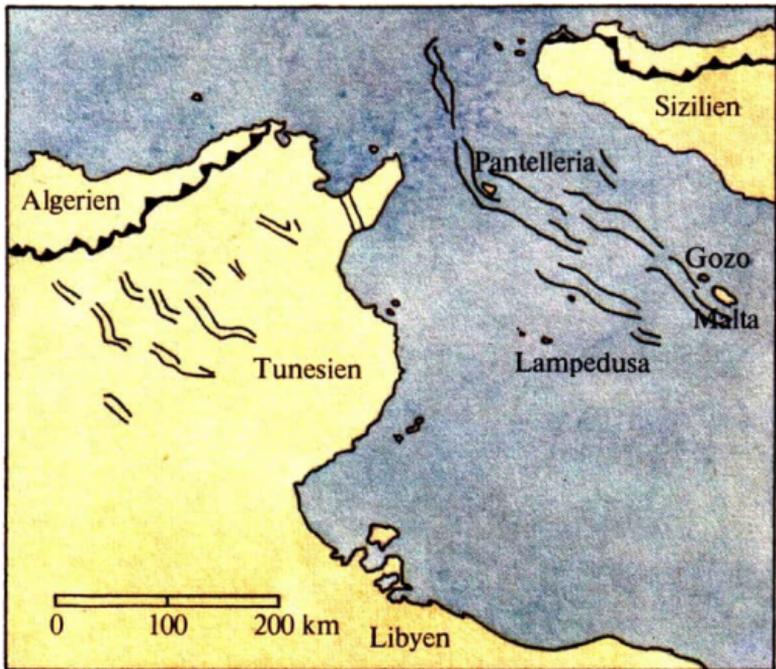
zierte Bewegungen vor sich, mit jährlichen horizontalen und vertikalen Versetzungen von rund 5 bis 7,5 cm. Das beweisen Erdbeben wie das von San Francisco (1906) oder jüngst im Raum von Los Angeles, wo in nicht zu ferner Zeit weitere Beben zu erwarten sind. Seit rund 40 Millionen Jahren hat sich die Niederkalifornische Halbinsel um etwa 240 km vom amerikanischen Festland entfernt und verschiebt sich weiter. Zerstörungen an Verkehrswegen, Brücken und Gebäuden sind dort alltägliche Erscheinungen, die an die Bauingenieure besondere Anforderungen stellen. Deshalb sind gerade hier und in Japan wesentliche Ergebnisse für das Bauen in erdbebengefährdeten Gebieten erzielt worden. Durch umfangreiche und vielseitige Meß- und Überwachungssysteme wird das ganze Gebiet ständig überprüft, um sich anbahnende Erschütterungen voraussagen zu können.

Eine 350 Millionen Jahre alte Transformstörung aus dem Erdaltertum befindet sich in Schottland, die Great-Glen-Zone, in der der Loch Ness liegt (siehe Abb. auf S. 107). Hier hat sich der nördliche Teil um rund 100 km nach Südwesten verschoben.

## Geburt und Tod eines Ozeans

Die ostafrikanische Bruchzone setzt sich im Roten Meer und im Golf von Aden fort, das heißt, daß hier die Gräben mit Meerwasser gefüllt sind. Jüngste schwere Erdbeben in der Jemenitischen Arabischen Republik lehren (November/Dezember 1982), wie aktiv und gefährlich Mutter Natur am Werke ist.

Und es gibt noch mehr Anzeichen für das Wirken erdinnerer Kräfte bei der Umgestaltung unseres Planeten. Wir fragen nach den Ursachen und Gesetzmäßigkeiten der geotektonischen Vorgänge. Weil wir zu wissen glauben, daß ein sich neu bildender Ozean mit dem Entstehen eines innerkontinentalen Grabensystems beginnt, das heißt also mit Dehnung und nachfolgendem Zerbrecen eines Kontinents, wurde der leicht zugängliche Oberrheingraben in den letzten beiden Jahrzehnten im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungs-



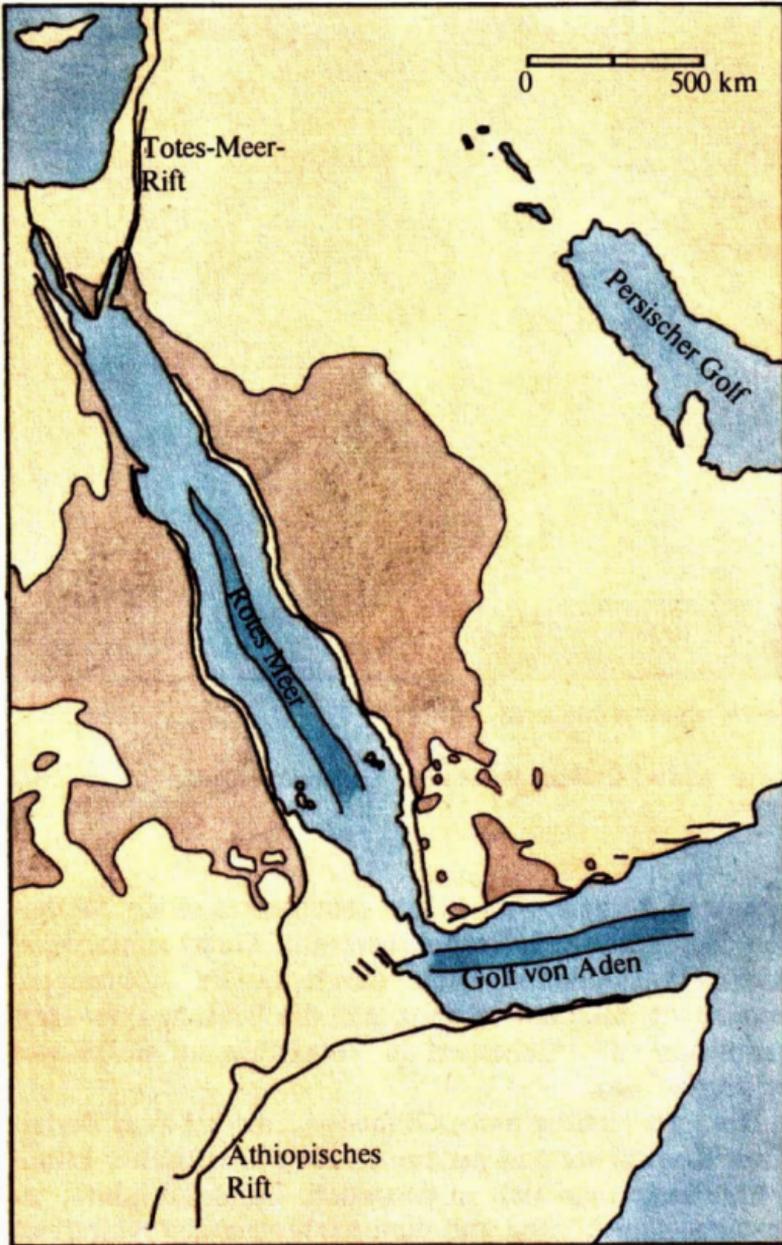
▲ alpine Kollisionsfront

== Gräben

*Junge aktive Gräben im Raum Sizilien/Nordafrika (nach Illies 1981)*

projekten komplex, auch mit geophysikalischen Methoden (Sprengseismik, Erdbebenseismik, Geothermie, Felsmechanik, Geodäsie) und durch tiefere Bohrungen, untersucht. Man hat erkannt, daß die Ursachen der Grabenbildung mit Sicherheit in Vorgängen im Erdmantel zu suchen sind.

Die Entwicklung eines Grabensystems bis zum Zerfall eines Kontinents und bis zur Bildung ozeanischer Lithosphäre kann man sich so vorstellen: Zunächst kommt es zu einer Aufwölbung und dem nachfolgenden Aufreißen der Erdoberfläche. Im Scheitel der Aufwölbung entwickeln sich Spalten und Gräben, und bedingt durch das subkrustale Zuströmen von Mantelmaterial, kommt es zu einem ausgedehnten basaltischen Grabenvulkanismus. Die kontinentale Lithosphäre wird zunehmend umgeformt und vermischt. Es erfolgt weitere Dehnung und



 axiale Riftzonen  
 Grabenbrüche

 präkambrische Gesteine

*Das Rote Meer mit seinem Zentralgraben und den Randgebieten (nach Drake und Girdler 1964)*

Spreizung mit Bildung ozeanischer Kruste. Vereinzelt ist schon eine Verbindung mit dem Ozean vorhanden. Infolge Verdunstung von Meerwasser werden örtlich Salzgesteine abgelagert, bis infolge Ozeanbodenausweitung Meerwasser in den Graben stärker eindringt und sich der Ozean im Tiefseebereich ausbreitet. Die Neubildung ozeanischer Kruste geht verstärkt vor sich, während die erkaltete alte Kruste in zwei entgegengesetzte Richtungen auseinandergezogen und verfrachtet wird. Der innerkontinentale Graben hat sich zu einem Ozean erweitert. Bei diesem Öffnungsprozeß der Lithosphäre unterscheidet man nach J. T. Wilson (1968) drei Stadien:

1. *Graben- oder Riftstadium*: embryonale Stufe, verbunden mit der Förderung unterschiedlicher Schmelzen in mehreren Episoden. Die ostafrikanischen Gräben oder der Oberrheingraben sind Beispiele dafür.

2. *Rotes-Meer-Stadium*: junge Stufe. Die Ozeanbodenausweitung hat eingesetzt. Seit dem Miozän vor rund 20 Millionen Jahren hat sich der innerkontinentale Graben erweitert und ist mit Unterbrechungen zu einem ozeanischen Spalt geworden. Vor 5 Millionen Jahren haben sich Afrika und Arabien voneinander getrennt und entfernen sich weiter. Das Rote Meer erscheint als eine Art junger Atlantik, dessen zentrales Rift nicht älter als 2 Millionen Jahre ist. Im Golf von Aden ist die Entwicklung weiter gegangen. Die Lithosphäre ist hier 40 bis 60 km auseinandergezerrt, und es ist ein bis zu 2500 m tiefer Scheitelgraben entstanden. Wie im Roten Meer wurde innerhalb des sich ausweitenden Grabenbereiches neue ozeanische Kruste geschaffen.

3. *Atlantikstadium*: reife Stufe. Es hat sich ein Ozean mit einem mittelozeanischen Rücken gebildet. Ständig entsteht neuer Ozeanboden. Europa und Grönland/Nordamerika bzw. Afrika und Südamerika entfernen sich immer mehr voneinander.

Somit ergibt sich, daß große intrakontinentale Gräben eine Kontinentalverschiebung einleiten können. Doch laufen diese Prozesse im einzelnen unterschiedlich ab. Das ostafrikanische Bruchsystem erscheint zwar als ein Beispiel für beginnendes kontinentales Zerbrecen, aber die Ausweitung geht viel langsamer vor sich als im Golf

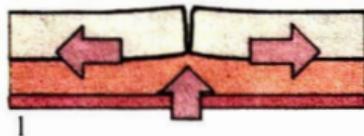
von Aden. In rund 20 Jahrmillionen haben sich die Gräben kaum mehr als 20 bis 25 km gedehnt, wenn auch die Geschwindigkeit der Ausweitung im Laufe der Zeit zwischen 1 und 3 cm jährlich gewechselt hat. Die Gräben lassen keine Transformstörungen erkennen wie die ozeanischen Riffe. Nicht anders steht es mit dem Baikalgaben und dem Oberrheingaben, dessen Flanken derzeit weniger als 0,5 mm jährlich auseinanderrücken und dessen Senkung nur 0,8 mm im Jahr erreicht.

Nicht jedes kontinentale Rift dürfte zu einer ozeanischen Entwicklung führen, zumindest nicht ohne Verzögerung. Es scheint, als ob jedes Stadium der Entwicklung sozusagen »einfrieren«, mithin zum Stillstand kommen kann. Es gibt also noch manche Rätsel bei der Analyse der großen intrakontinentalen Bruchzonen, die in manchem wohl andersartig sind als die ozeanischen Bereiche. Doch meint eine Reihe von Geologen, es sei nur eine Frage der Zeit, wann sich das ostafrikanische Bruchsystem ozeanisch entfaltet, sich die Gräben verbreitern und die dortigen Seen mit Meerwasser füllen. Wir halten diese Voraussage zumindest für verfrüht und nicht beweisbar.

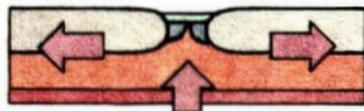
Dem Öffnungsprozeß eines Ozeans steht der Schließungsvorgang gegenüber, der die Dehnung der Lithosphäre durch *Subduktion* ausgleicht. So werden Atlantik und Indik größer, der Pazifik dagegen schrumpft. Schließung erfolgt dort, wo an den den Ozean begrenzenden Rändern Konvektionsströme abwärts gerichtet sind und zwei Großschollen der Lithosphäre, von denen meist die eine in einer nur 60 bis 100 km breiten Zone in einem Winkel von etwa 45° nach unten durchgebogen ist, kollidieren, randlich zerbrechen und, wie im Bereich der Inselbögen und Tiefseegeesenke, schließlich absinken und das Material in die Tiefe gezerrt wird. Als ein Hinweis, daß es wirklich so ist, erscheint die Tatsache, daß bei den Tiefseegräben die eine Flanke stärker nach der Tiefe geneigt ist als die andere. Aber auch untermeerische Vulkanberge lassen oft eine Kippung von 20° und mehr erkennen.

Jede Subduktion ist auf der geneigten Ebene mit Tiefherdbeben höchster Stärke bis in 720 km Tiefe verbunden

### Öffnungsprozeß



1

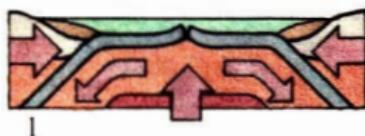


2



3

### Schließungsprozeß



1



2



3

*Idealer plattentektonischer Zyklus (nach J. T. Wilson 1970).*

*Öffnungsprozeß: 1 – Bildung von tiefreichenden Brüchen und Bruchzonen in einem kontinentalen Krustenblock (Graben- bzw. Riftstadium), z. B. Oberrheingraben, Ostafrikanisches Bruchsystem; 2 – Entstehung eines kontinentalen Grabenbruchs mit dem Scheitelgraben (rift valley); der Ozeanboden beginnt sich auszubreiten (Beispiel: Rotes Meer); 3 – fortgeschrittenes Weitungsozeanstadium (Atlantikstadium); ständige Erweiterung des Grabens durch Dehnung; ein ozeanischer Rücken hat sich gebildet, dessen Rift weiterhin magmatisch aktiv ist.*

*Schließungsprozeß: 1 – Aufeinanderzuwandern zweier Lithosphärenplatten infolge des Abtauchens ozeanischer Kruste (Andentyp); Auffaltung im Bereich der Subduktionszone (Pazifikstadium); 2 – Restozeanstadium (Mittelmeerstadium) mit weit fortgeschrittener Sedimentation; 3 – intrakontinentales Faltengebirge nach der Kollision zweier Platten (Himalajastadium)*

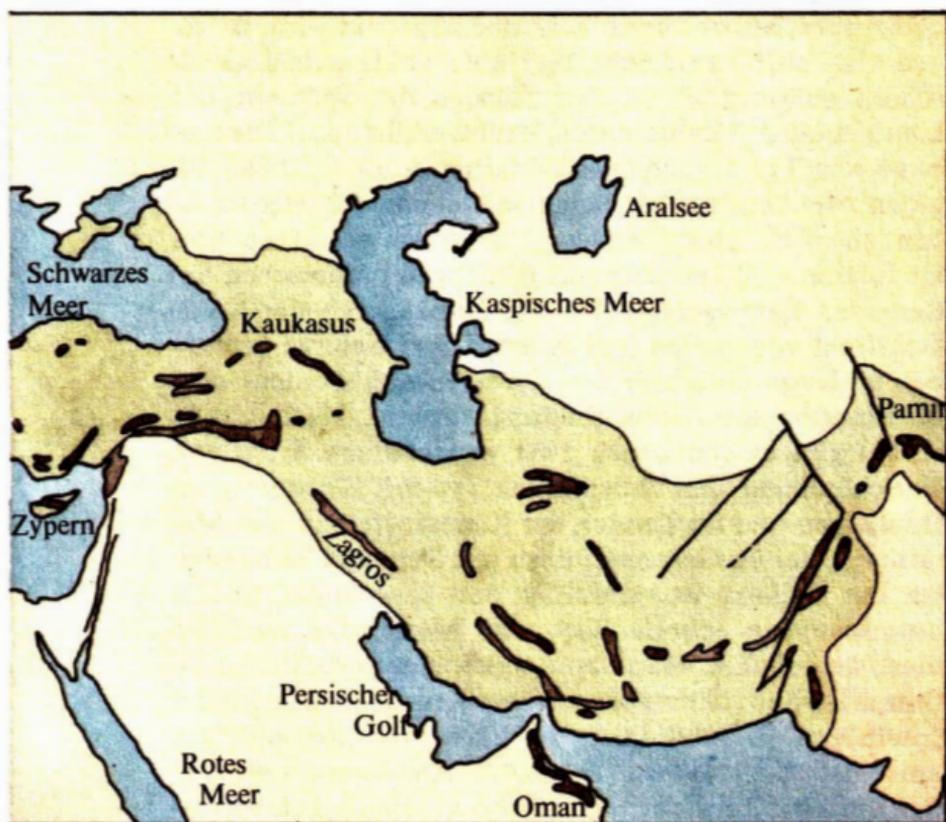
und geht bei maximal 350 km Entfernung von den Tiefseegeesenken vor sich. Zu den Erdbeben kommt ein bezeichnender andesitischer Vulkanismus. Die Zone, in der eine ozeanische Großscholle unterhalb eines Tiefseegeesenkes unter den Kontinent eintaucht, heißt nach einem amerikanischen Geophysiker *Benioffzone*. Die absinkenden Teile werden in der Tiefe in Zeiträumen von 10 und mehr Millionen Jahren langsam aufgeschmolzen, mit



Die Verbreitung von Resten ozeanischer Lithosphäre in den alpidischen Faltengebirgen (nach Tollmann 1978). Braun: Ophiolithe (vgl. S. 17)

saurem Krustenmaterial der kontinentalen Gegenscholle vermischt und schließlich vom Mantel assimiliert. So gelangen sie in den Wirkungsbereich der Konvektionsströme, die in den Riftzonen der Rücken die Gesteinschmelze wieder nach oben bringen. Damit kann das Material von neuem an dem geschlossenen Kreislauf teilnehmen.

Nicht überall kann die Ozeanbodenspreizung durch Subduktion im Gebiet der Tiefseegeesenke ausgeglichen werden wie im Pazifik, am Antillen- oder Sundabogen. Für Atlantik und Indik nimmt man an, daß die Ausweitung durch die Verschiebung von Nord- und Südamerika bzw. von Australien kompensiert wird (Chain 1973).



Um den Vorschlag, im Bereich von Subduktionszonen Industrieabfälle und sogar radioaktives Material oder Müll zu versenken, die dann ohne menschliches Zutun vom Erdinneren aufgenommen und »verdaut« würden, ist es ruhiger geworden. Sowjetische Ozeanographen haben erkundet, daß die Tiefseegesenke kein stehendes totes Wasser enthalten, sondern daß auch hier ein intensiver Austausch mit Oberflächenwasser stattfindet, so daß man unter Umständen ganze Ozeane vergiften könnte. Freilich ist es bis jetzt nicht gelungen, die noch offenen physikalisch-mechanischen Fragen des Subduktionsprozesses befriedigend zu beantworten.

Wie beim Öffnungsprozeß unterscheidet T. Wilson auch bei den Schließungsvorgängen von Ozeanen drei Stadien:

1. *Pazifikstadium*: absinkende oder abnehmende Stufe. Der Ozean beginnt sich langsam zu schließen, indem die

ozeanische Kruste verschluckt und abgebaut wird. Bewegen sich eine ozeanische und eine kontinentale Großscholle aufeinander zu, entstehen an der Stirnseite der kontinentalen Scholle durch Raumverkürzung Faltengebirge vom Typ der südamerikanischen Anden. Stoßen dagegen zwei kontinentale Schollen aufeinander oder schieben sie sich übereinander – man spricht dann von Obduktion –, bilden sich aus mächtigen ozeanischen Sedimenten Faltengebirge wie der Himalaja an der Kollisionsfront von Indien und Asien. Diese Gebirge verbleiben so lange innerhalb der Kontinente, bis erneut eine intrakontinentale Grabenbildung einsetzt. Nach Uyeda (1981) gibt es vermutlich zwei verschiedene Arten von Verschluckung, den chilenischen Typ mit Einengung im Inselbogen und im Bereich der Randmeere und den Marianatyp, der im Gegensatz dazu mit Dehnung verbunden ist. Der Chiletyp ist vermutlich dort ausgebildet, wo die unterschobene Scholle flach, der Marianatyp dort, wo diese steil einfällt. Man trennt weiter eine vollständige Lithosphäre-Subduktion ozeanischer Kruste im Bereich der Inselbögen (B-Subduktion zu Ehren von Benioff) von einer A-Subduktion (zu Ehren von Ampferer), die lediglich einzelne Teile der Lithosphäre unterhalb kontinentaler Kruste wie bei der Bildung der Alpen ergreift.

2. *Mittelmeer- oder Restozeanostadium*: weitgehend geschlossene Stufe. Der Ozean ist durch das langzeitliche Aufeinanderzubewegen zweier Großschollen bis auf einen geringen Restraum verschmälert. Die Einengung erfolgt in mehreren zeitlich und in der Intensität unterschiedlichen Etappen. Kleine Restmeere wie das europäische Mittelmeer oder das Schwarze Meer zwischen der europäischen und afrikanischen Großscholle sind noch erhalten.

3. *Kollisions- oder Narbenstadium*, auch *Himalajastadium*: völlig geschlossene Stufe. Der Ozean ist infolge von Schließungsvorgängen verschwunden. Inmitten älterer Strukturen der neu entstandenen Faltengebirge haben sich tiefreichende Narben und Brüche entwickelt, in deren Bereich von Störungen begrenzte Gesteinsassoziationen der Tiefsee (Ophiolithe) ein vorausgehendes ozeanisches Entwicklungsstadium anzeigen, wie in vielen

alpidischen Gebirgen. Diese Komplexe lassen in ihrer Lagerung keine direkte Verbindung mit dem oberen Mantel mehr erkennen, aus dem die ophiolithischen Serien einst aufgestiegen sind. Es scheint, als ob es nach Abschluß globaler Schließungsprozesse eine Periode mehr oder weniger großer Zeiten mit einer gewissen tektonischen Ruhe gibt, bevor es zu erneuter globaler Drift kommt. Deren Richtung muß nicht die gleiche sein wie zuvor.

Die zyklische Entwicklung der Ozeane erfolgt also im ganzen in einem *Öffnungs-* und einem *Schließungsprozeß*, dem nach dem kanadischen Geologen J. T. Wilson genannten *Wilsonzyklus*. Man sollte sich aber hüten, darin mehr als ein ideales Schema zu sehen. Bedingt durch die Variabilität des geologisch-tektonischen Geschehens im Raum, in der Zeit und nicht weniger im stofflichen Bereich können sich vielfältige Abweichungen ergeben.

## Versunkene Festlandsreste im Ozean?

Nach unseren bisherigen Darlegungen besteht der Boden der großen Weltmeere aus ozeanischer, basaltischer Lithosphäre, die durch Ozeanbodenspreizung entstanden ist. Bohrungen, die im Atlantik zwischen Irland – Schottland und Island vorgenommen wurden, brachten eine Überraschung. Hier wurde eine breite untermeerische Struktur, die Grönland-Schottland-Schwelle, festgestellt, die in der 21 m hohen Rockallklippe aus dem Atlantik emporragt. Die kleine Insel besteht nicht aus basaltischen Gesteinen, sondern aus kontinentaler Lithosphäre, aus rund 60 Millionen Jahre alten Graniten. Die Schwelle selbst ist frei von Erdbeben («aseismisch») und vulkanischen Erscheinungen. Wie ist das zu erklären? Ein Stück Festland mitten im ozeanischen Meeresboden? Man glaubt, daß es sich um den Rest eines versunkenen Kontinents, einen *Mikrokontinent*, handelt, der in mehreren Phasen um wenigstens 1400 m in die Tiefe abgesunken ist. Reste von Fossilien in den Ablagerungen über den granitischen Gesteinen beweisen das. Als sich Grönland von den Britischen Inseln trennte und nach Westen driftete, hat sich die Schwelle von Grönland an einem tiefen

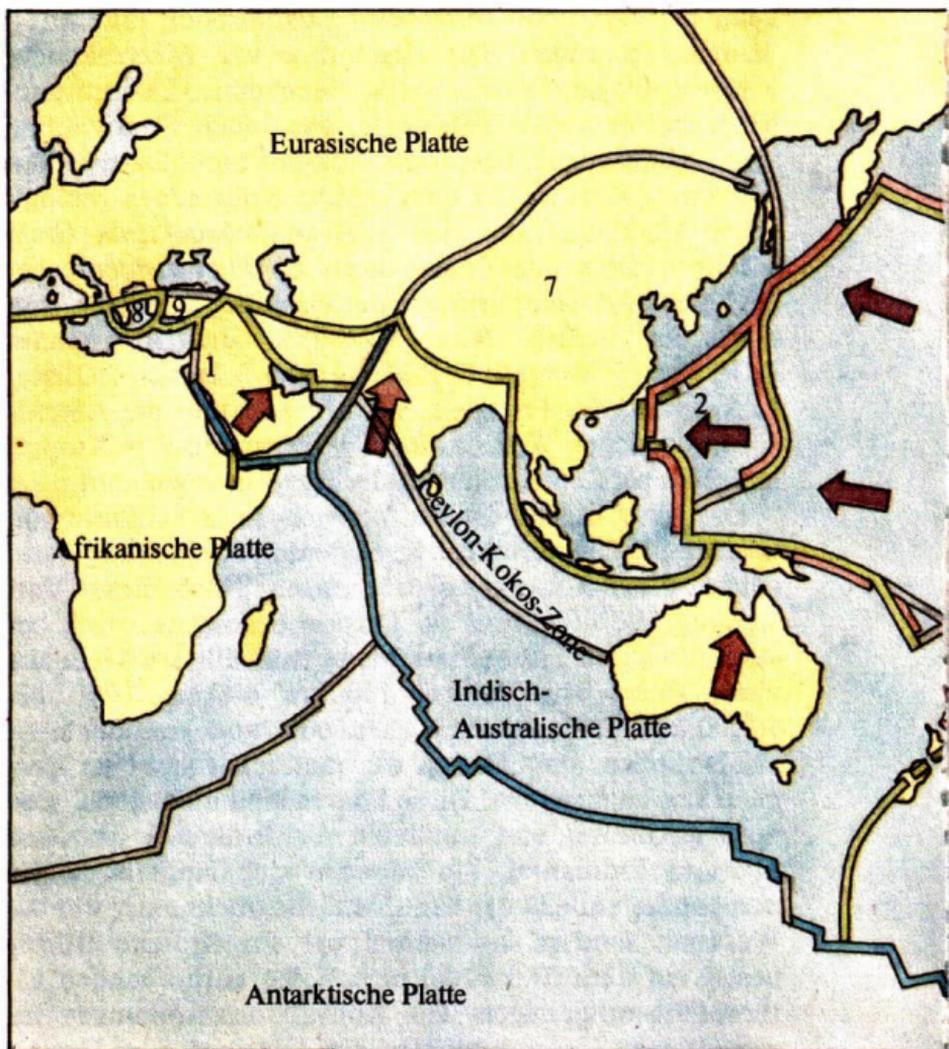
Bruch losgelöst und ist zurückgeblieben. Diese Grönland-Schottland-Struktur ist nicht der einzige Rest versunkener kontinentaler Lithosphäre im ozeanischen Bereich. Man kennt gegenwärtig über zwanzig Mikrokontinente oder *aseismische Rücken*. Zu ihnen gehören die landfernen Inseln der granitischen Seychellen, Amiranten und Maskarenen im Indischen Ozean südlich des Äquators, rund 1000 km nordwestlich von Madagaskar, die schon Wegener als Kontinentfragmente angesehen hat. Die Kanarischen Inseln hält man in gleicher Weise für einen Festlandsrest wie die Insel Sokotra im Norden des Horns von Afrika mit granitischen Anteilen, die Janschin als Restscholle Afrikas deutet und die allseitig von ozeanischer Kruste umgeben wird. Auch der 1700 km lange Lomonossowrücken im Nordpolarmeer soll sich von Sibirien abgelöst haben und kontinentalen Charakter besitzen. Freilich besteht nicht immer darüber Klarheit, ob die Sedimente und Granite nicht von ozeanischen Basalten unterlagert werden. Ein offenes Problem ist die kontinentale Antarktis, die zu 98% mit Eis bedeckt ist. Wir kennen dort junge Faltengebirge und einen rezenten Vulkanismus, aber es fehlen die Erdbeben. Verschieben sich möglicherweise nur die übrigen Kontinente, und Antarctica ist ein starrer Block?

## Das neue Bild einer lebendigen Erde

»Pour voir les choses il faut les croire possibles« (»Um die Dinge zu erkennen, muß man sie zunächst einmal für möglich halten«), hat der große französische Alpengeologe M. Bertrand (1847–1907) gesagt. Dieses Wort trifft auch für das Problem zu, ob man horizontale Driftbewegungen und konvektive Steuerungsprozesse anerkennt oder trotz zahlreicher Gegenargumente auf fixistischem Standpunkt beharrt. Eins ist sicher: Die neuen Beobachtungen, Erkenntnisse und Ideen weisen trotz vieler Unvollkommenheiten und mancher offener Fragen – wo gäbe es die in der Wissenschaft nicht? – gegenüber älteren Hypothesen viele Vorzüge auf. Daher haben sie als eine mechanisch einfache und klare Modellvorstellung

auch bei Zweiflern weitgehend Zustimmung und Anerkennung gefunden. Die Ergebnisse von Meereskunde, Meeresgeologie, Seegeophysik, Geochemie, Paläomagnetik, experimenteller Petrologie, aber auch Stratigraphie und Paläontologie, besonders Mikropaläontologie, haben vor rund 20 Jahren zur Entwicklung eines neuen geologischen Modells geführt, das als *Neue Globaltektonik*, *Großschollentektonik* oder heute meist als *Plattentektonik* bezeichnet wird. Geologen wie der Kanadier T. Wilson, von dem der Begriff *Platten* stammt, die Amerikaner H. H. Hess, J. Morgan, D. P. McKenzie, B. Isacks, J. Oliver, L. R. Sykes, der Franzose X. Le Pichon und die sowjetischen Geologen W. E. Chain, A. V. Pejve und P. N. Kropotkin seien als Repräsentanten der Hypothese genannt.

Das neue Modell ist der Versuch einer Synthese von Ozeanbodenausweitung, Kontinentalverschiebung und subkrustalen Konvektionsströmungen. Nach dieser Vorstellung, die oft schon als Theorie bezeichnet wird, besteht die starre Lithosphäre bis in rund 100 km Tiefe aus einer Reihe von 70 bis 100 km dicken, 1000 bis 10000 km<sup>2</sup> großen ozeanischen oder/und kontinentalen Großschollen, den *Platten*, die randlich von tiefen Brüchen begrenzt werden. Diese Platten sind nicht eben, sondern gekrümmt und umfassen die Erdkruste und den obersten Erdmantel. Sie bewegen sich langsam relativ zueinander entlang der Erdoberfläche, nicht aktiv wie bei Wegener, sondern sie werden wie eingefrorene Hölzer passiv auf dem Erdmantel in der sich ausbreitenden Lithosphäre mitgetragen. Die Konvektionsströmungen im zähflüssigen Untergrund sind für Transport und Gestaltung verantwortlich. Nach der Auffassung sowjetischer Geowissenschaftler soll die Plattenbewegung eng mit der Bildung und dem kontinuierlichen Wachstum des Erdkerns zusammenhängen, indem in der Grenzzone von Mantel und Kern bei hohen Drücken und Temperaturen Mantelmaterial aufgearbeitet wird und sich dabei der Kern vergrößert. Freilich gehen diese Gedanken von bestimmten Vorstellungen über die Zusammensetzung des inneren und äußeren Erdkerns bzw. dem davon abweichenden Mantel aus, die noch nicht bewiesen sind. Andere meinen, daß die subduzierte ozeanische Lithosphäre



- Zentralgräben mit Transformstörungen
- Subduktionszonen (Konvergenzbereiche)
- Charakter unsicher
- vulkanische Inselbögen

*Großplatten und kleinere Platten der Lithosphäre. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung der Lithosphäre an. 1 – Arabische Platte; 2 – Philippinenplatte; 3 – Kokosplatte; 4 – Karibische Platte; 5 – Nasca- oder Ostpazifische Platte; 6 – Südsandwichplatte; 7 – Südostasiatische Platte; 8 – Ägäische Platte; 9 – Türkische Platte; 10 – Juan-de-Fuca-Platte; 11 – Riveraplatte*



die Konvektion unterhalb der kontinentalen Lithosphäre beeinflusst und es zur Ausbildung flacher Konvektionsrollen mit einer horizontalen Dimension zwischen 3000 und 4000 km im kontinentalen Mantel komme, wie Experimente lehrten (C. Froidevaux, H. C. Nataf 1981). Diese flachen Zellen seien für Dehnungsvorgänge und das Zerbersten der Kontinente verantwortlich.

Im Sinne der Plattentektonik besteht die Erde aus einer unterschiedlichen Anzahl von *Groß-* oder *Makroplatten*. Während Le Pichon (1968) von sechs Platten (Pa-

zifik, Amerika, Eurasien, Afrika, Australien, Antarktis) ausgeht, unterscheiden Dietz und Holden (1970) neun Platten (Eurasia, Africa, India, Australia, Antarctica, Nordamerica, Südamerica, Nordpacific, Südpacific). Zwischen den Großplatten existieren einzelne kleinere Platten wie die Arabische, Somalische, Nubische, Karibische oder Türkische Platte. Die Platten bestehen aus kontinentalen und/oder ozeanischen Bereichen mit ihrem unterschiedlichen Krustenbau. Später hat man 13 und bis zu 20 oder noch mehr Platten postuliert. Hamilton (1971) zählt allein in Asien 15 Platten und meint, die Kontinente seien *Plattenagglomerate* aus einer Reihe »Mikroplatten«. Wie speziell die plattentektonische Analyse im kompliziert gebauten Mitteleuropa lehrt, erscheint es sicher, daß es viele kleine und kleinste Platten gibt. Freilich wird so das Großbild der Plattentektonik verwässert, weil man komplexe Gebilde immer in Einzelbereiche auflösen kann. Seibold (1974) spricht von einer »die große Idee verschleiernden Kleinstaaterei«. Die ozeanischen Platten bewegen sich durchschnittlich 5 cm, die kontinentalen dagegen nur 1,5 cm jährlich.

## Die Motoren der Bewegung

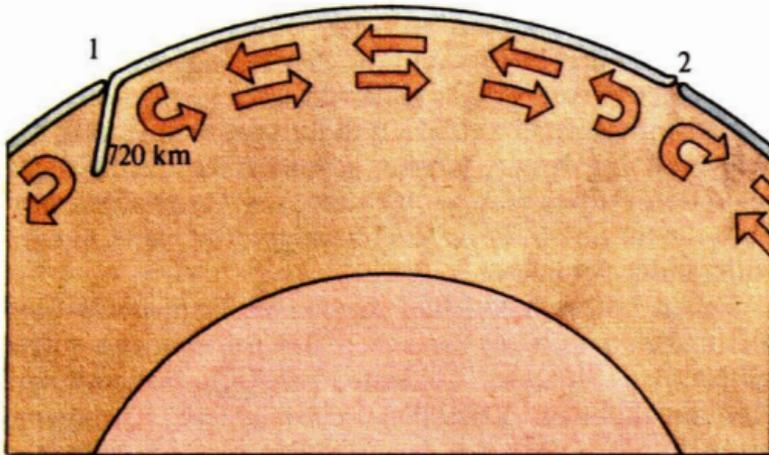
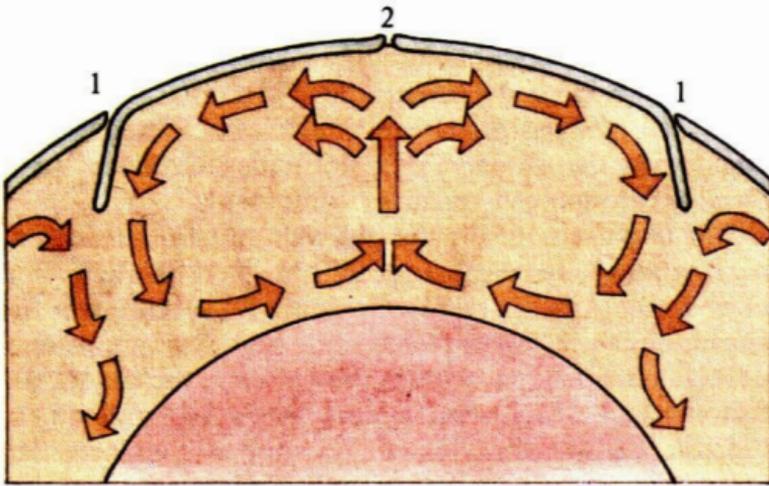
Die Plattentektonik greift die von Ampferer und später von R. Schwinner (1935), E. Kraus (1941) und A. Rittmann (1960) entwickelten Gedanken aktiver Konvektionsströmungen in der zähflüssigen Asthenosphäre des oberen Mantelbereiches in 100 bis 300 km Tiefe auf. Man konnte seit rund 20 Jahren von geophysikalischer Seite zeigen, daß Konvektion im oberen Erdmantel durch Kriechvorgänge auch im festen Zustand möglich ist (S. K. Runcorn 1981). So gesehen, erscheint die Plattentektonik als der oberflächliche Ausdruck einer thermalen Konvektion in der Tiefe. Für eine Reihe Geotektoniker wie E. Kraus und A. Rittmann sind Konvektionsströmungen Tatsache. Über die Ursachen dieser Wärmeleitungsströme wurden verschiedene Gedanken entwickelt. Vermutlich hängen sie mit thermisch bedingten Dichtedifferenzen zusammen, die zu einer Zirkulation des teilweise

aufgeschmolzenen Mantelmaterials führen. Der Wärmetransport von Material durch Fließvorgänge bietet eine plausible Erklärung, zumal die Physikalische Chemie lehrt, daß in Flüssigkeiten mit ungleicher Verteilung der Dichte aus thermischen und stofflichen Gründen kreisförmige Strömungen zustande kommen.

Die Geschwindigkeit der Konvektionsströme erreicht nach vorliegenden Schätzungen 3 bis 5 cm jährlich. Von einer Reihe Autoren werden mehrere Konvektionsströme angenommen. E. Kraus rechnet mit zwei Strömungsstockwerken, einem Hyporheon in der Unterkruste, das für die tektonischen Strukturen verantwortlich ist, und einem tieferen Bathyrheon, dessen Wirkung die universellen geotektonischen Großstrukturen wie Kettengebirge und Inselbögen hervorruft. Andere meinen, es gebe drei (Wunderlich 1966), vier oder fünf solcher in sich geschlossener Ringströme, an deren Oberseite sich das Material horizontal bewegt und die Platten transportiert. Der Schweizer Pavoni (1981) geht von zwei geotektonischen Zentren im zentralen Afrika und im zentralen Pazifik mit sehr breit angelegten, langsam aufsteigenden Strömungen als Quellgebieten des geotektonischen Geschehens aus. Er stellt sie sich in Form großräumiger, um steile Achsen rotierender Felder vor.

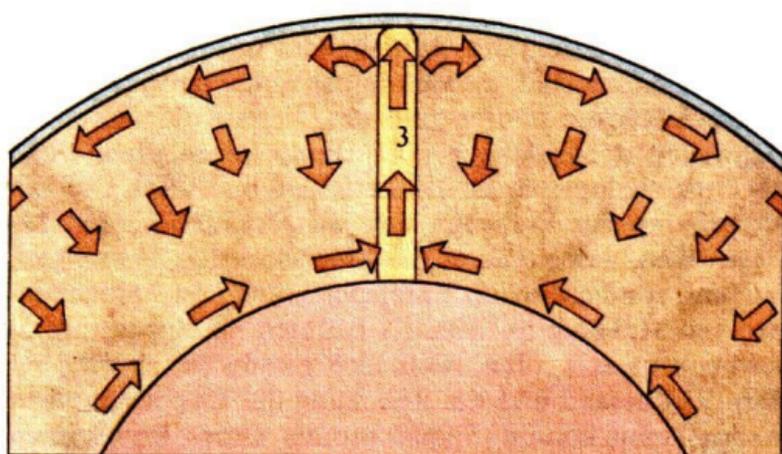
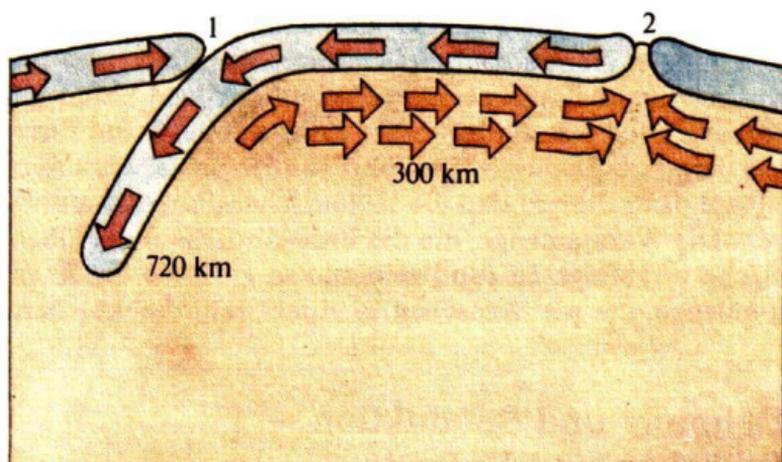
Neben unterschiedlichen regionalen Temperatur- und Dichtedifferenzen als Ursachen der Strömungen sollen radioaktive Prozesse, nukleare Vorgänge, interatomare Kettenreaktionen, Kristallisationsereignisse, Turbulenzerscheinungen nach Art der Zyklonen und Antizyklonen in der Atmosphäre und anderes eine Rolle spielen. Neben den thermischen und physikalisch-chemischen Ursachen sind die mechanischen Eigenschaften des Mantels wichtig. So ist Illies (1970) der Meinung, daß die harmonische Anordnung der kontinentalen Massen einen mechanischen Antrieb wahrscheinlicher mache als einen thermischen.

Sicher ist die Konvektion nicht zuletzt von den Gesetzmäßigkeiten des Fließverhaltens der Materie, mithin von deren rheologischen Gegebenheiten, abhängig. Strittig bleibt, ob die Konvektion nur in der Asthenosphäre oder auch im tieferen Mantel vor sich geht.



*Konvektionsströme und ihre Bedeutung für die Bewegung der Lithosphärenplatten. Durch die Konvektion kommt es zum Aufstieg wärmeren und zum Absinken kälteren Materials (nach Scientific American 1976). Blau: Lithosphäre; hellbraun: Mantel; rötlich: Kern. 1 – Tiefsee-graben; 2 – mittelozeanischer Rücken; 3 – Wärmebeule*

In neuerer Zeit steuert man auf nur periodisch oder zeitweise aktive, geschlossene Konvektionszellen zu, die sich zwischen dem heißen unteren Mantel und der kalten Kruste ausbilden. Die Bewegung soll ringförmig-zylindrisch oder kegelförmig sein. Trotz unterschiedlicher



Auffassung über Ursache, Anzahl, Stärke, Art und Tiefenlage der postulierten Konvektionsströmungen kommt keine der modernen geotektonischen Vorstellungen ohne sie aus. Speziell die Plattentektonik kann bei der Analyse der globaltektonischen Prozesse und Strukturen nicht auf Strömungen und Driftvorgänge verzichten. Die Frage bleibt offen, ob die geschilderten Prozesse im Inneren der Erde wie seit Jahrmilliarden auch zukünftig ablaufen werden, weil die thermische Energie unversiegbar sei. Einige Geowissenschaftler meinen aber, daß es in frühestens 2 Milliarden Jahren keine Konvektionsströme und Plat-

tenbewegungen mehr geben könne, weil dann die Erde ihre innere Wärme nach außen abgegeben habe und die die Wärmeproduktion steuernden radioaktiven Stoffe bei ihrem Zerfall ständig in immer mehr stabile, keine Energie liefernde Elemente überführt worden seien. Dies aber müsse dazu führen, daß die tektonischen Prozesse aufhören. Die Wärmemenge, die die Erde jährlich an der Oberfläche verabfolgt, ist rund zehnmal so groß wie die Energiemenge, die wir Menschen in einem Jahr verbrauchen.

## Dehnung und Subduktion – Erdbeben und Vulkane

Wir hörten, daß Dehnungsvorgänge in der Lithosphäre bei der Ausweitung des Ozeanbodens mit flachen Erdbeben verbunden sind, die sich in der Achse der mittelozeanischen Rücken häufen und den Verlauf der Riffe der Schwellen nachzeichnen. Die Herde liegen nicht tiefer als einige Kilometer, im Höchstfall 60 bis 70 km. Daß die Anordnung der Erdbeben erst spät erkannt worden ist, liegt daran, daß sie unter der Meeresoberfläche erfolgen. Vor den systematischen Untersuchungen und Entdeckungen von M. Tharp im Atlantik konnten die Beben mitunter beobachtet werden, wenn sich gerade ein Schiff über dem Rift befand und die Besatzung die Erschütterungen wahrnehmen konnte. Später wurden aktive Bruchzonen ebenso im Bereich der übrigen ozeanischen Rücken festgestellt. Diese Erdbeben weisen auf Bewegungen von Schollen, auf Dehnungsvorgänge in den Riffen hin und haben ihre Ursache darin, daß ein Teil der tektonischen Energie plötzlich freigegeben und in elastische Wellen umgewandelt wird. Beben sind meist auf schmale Streifen beschränkt, zwischen denen es selten zu stärkeren Erschütterungen kommt. Die Beben in den mittelozeanischen Rücken bilden eine Stütze für die Vorstellung von der Ausbreitung des Meeresbodens.

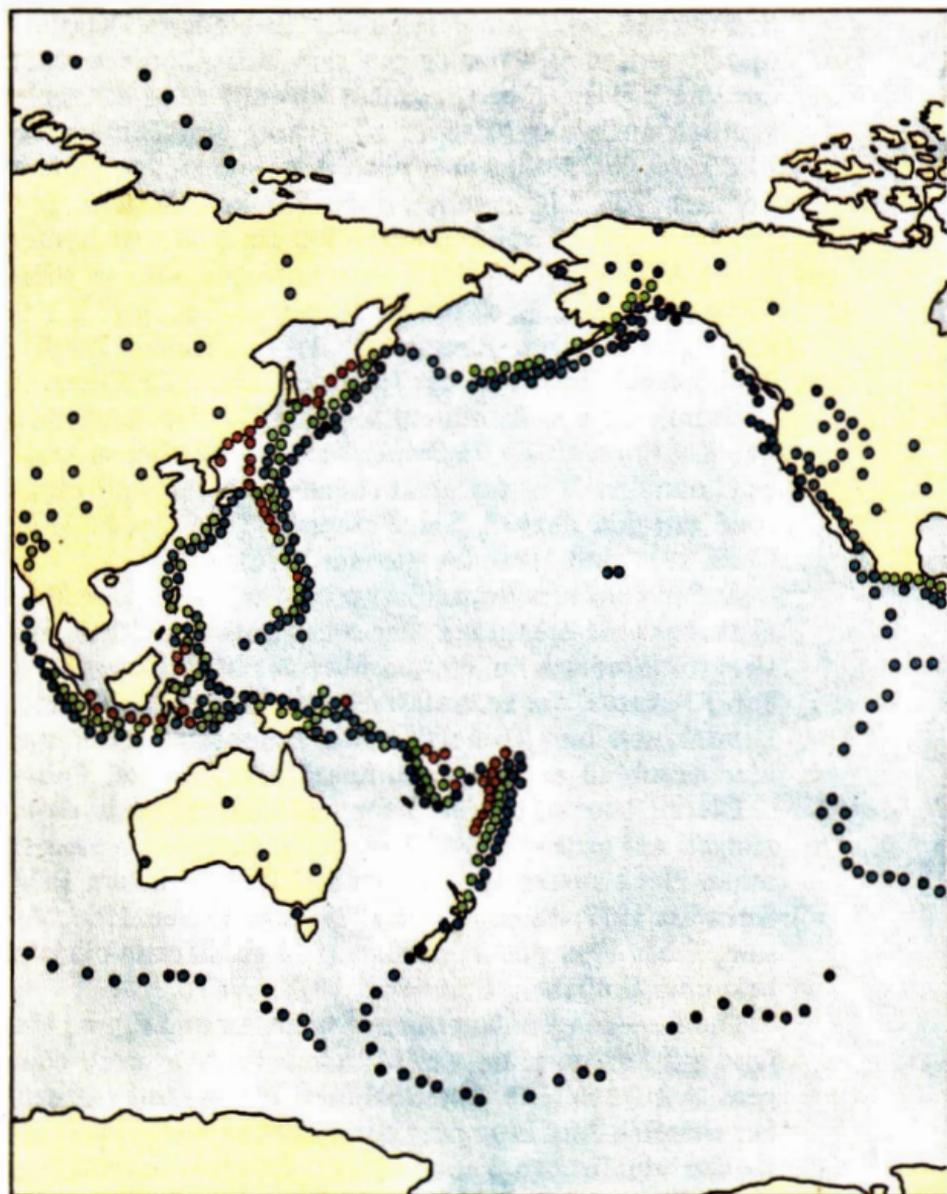
Eine andere Gruppe weit stärkerer Erdbeben finden wir im Zusammenhang mit den Subduktionsvorgängen der Platten an den Rändern des Pazifiks, wie im westlichen

Südamerika oder im Bereich der Inselbögen Ostasiens und Indonesiens. Hier zeigen sich Bebenherde entlang der vom Ozean zum Kontinent hin mit rund  $45^\circ$ , gelegentlich auch um  $30^\circ$  oder  $60^\circ$  schräg einfallenden Benioffzone. Sie ordnen sich nach der Tiefe zu von einigen Zehnern von Kilometern bis zu 730 km Tiefe an und scheinen sich in rund 100 bis 300 km Tiefe zu häufen (siehe Abb. auf S. 74). 90% aller Erdbeben sind an diese Zone gebunden. Flachherdige Erdbeben finden sich z. B. auf einem inneren Randgebiet des westlichen Pazifiks oder spiegelbildlich an der südamerikanischen Küste. In Richtung auf den Kontinent folgen mitteltiefe und unter den Kontinenten die *Tiefherderdbeben*. Tiefenbeben kennzeichnen den Weg der abtauchenden Platten und liegen rund um den Pazifik (San Francisco 1906, Japan 1923, Chile 1939 und 1960, Guatemala 1976).

Außer dem zirkumpazifischen Gürtel ist eine weitere Erdbebenzone erkennbar: der transasiatische Gürtel, der sich von Madeira im Westen über das Mittelmeergebiet, den Kaukasus, die zentralasiatischen Gebirge mit Pamir, Hindukusch und Himalaja nach Indonesien zieht und hier Anschluß an den zirkumpazifischen Gürtel findet.

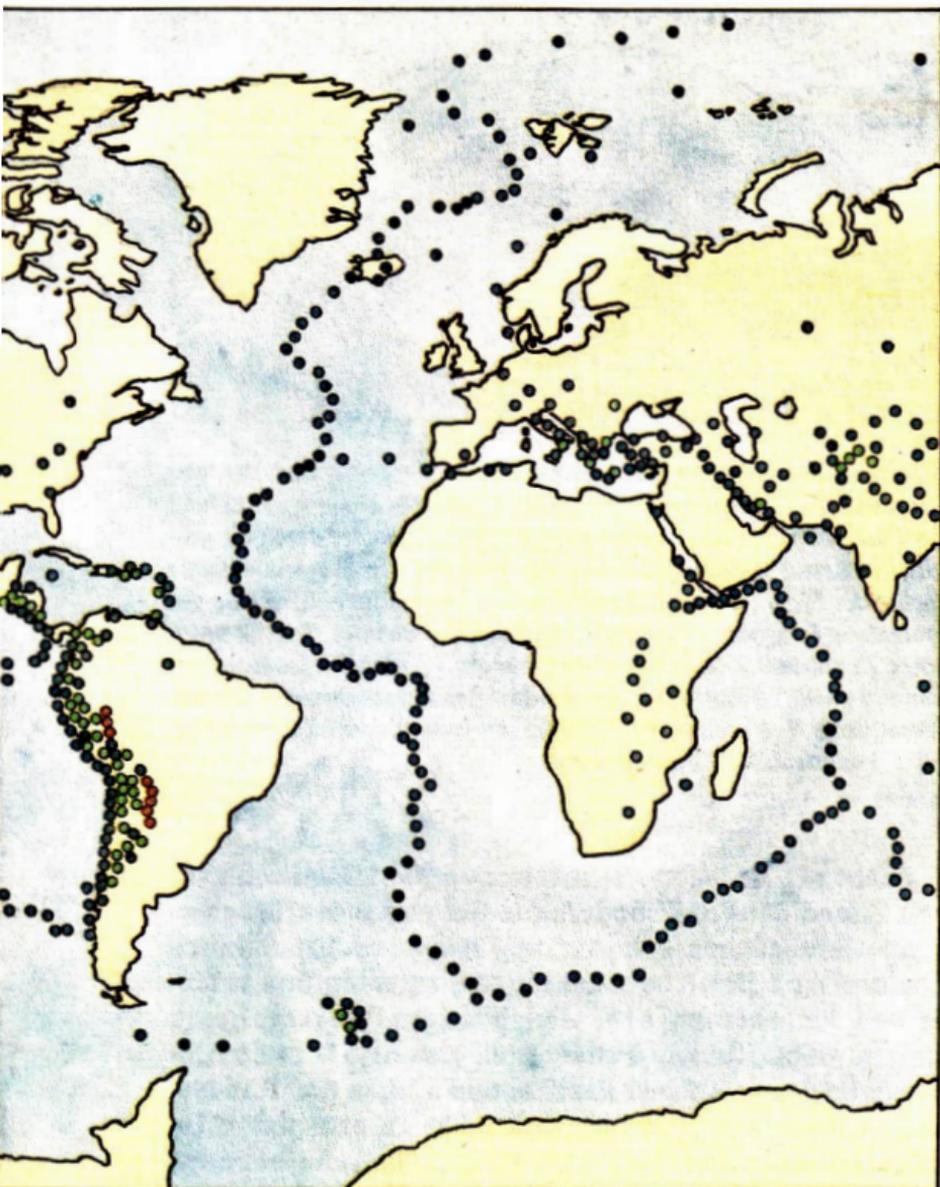
Die zu beobachtenden Beben hängen mit den Bewegungen der afrikanischen bzw. der indischen und asiatischen Platte zusammen (Messina 1908, Oberitalien 1976, Bukarest 1977, Montenegro 1979 bzw. Indien 1905, Assam, Tibet 1980 und Turkestan 1984 als stärkste bis jetzt bekannte Erdbeben, Iran 1962, 1978, 1983).

Die Bewegungen dauern noch heute an und führen laufend zur Schrumpfung des Mittelmeeres bzw. nach völligem Schließen und Verschwinden dieses Tethysozeans zur weiteren Auffaltung der europäischen und asiatischen jungen alpidischen Faltengebirge. Subduktionsvorgänge sind nur so lange möglich, wie sich zwei Platten unmittelbar berühren. Später kann es nur noch zu Aufspaltung und Bruchbildung der Lithosphäre kommen. Der Rest der vordem ozeanischen Platte liegt unter den zentralasiatischen Gebirgen und ist anscheinend nicht im Mantel versunken, weil die Zusammensetzung des Mantels unter den Ozeanen nicht die gleiche sein dürfte wie unter den Kontinenten. Jede Subduktion ist mit einer oft plötz-



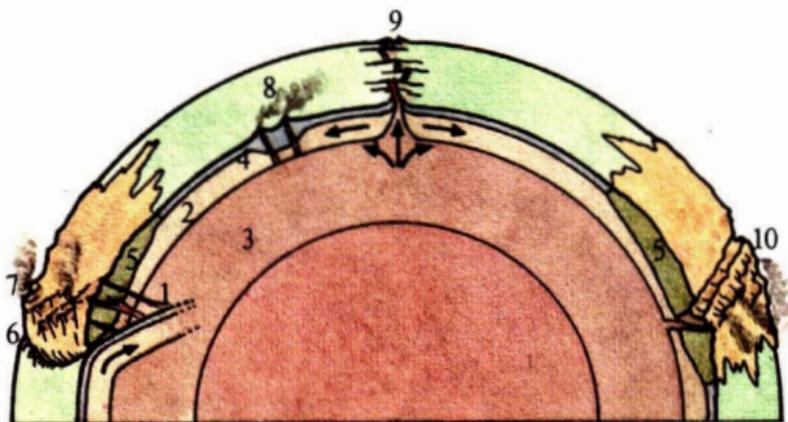
lichen Auslösung der angesammelten Spannungen verbunden und führt zu Erdbeben.

Außer den beiden großen Erdbebengürteln finden wir starke Beben in den riesigen Bruchzonen der Erde wie der Vardarzone Mazedoniens (Skopje 1963) oder den ostafrikanischen Gräben. Erdbebenzonen sind immer an die Grenzen starrer Lithosphäreplatten gebunden.



- Tiefbeben: 300 . . . 730 km Herdtiefe
- mitteltiefe oder intermediäre Erdbeben: 70 . . . 300 km Herdtiefe
- Flachbeben: 0 . . . 70 km Herdtiefe

*Die Verteilung der Erdbeben auf der Erde*



Schematisches Bild der plattentektonischen Prozesse und der vier Gruppen des Vulkanismus. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung der Platten an. 1 – aus Asthenosphäre und Lithosphäre durch die granitische Kruste aufsteigendes und die Vulkane der Subduktionszone speisendes Magma; 2 – Lithosphäre; 3 – Asthenosphäre, Quelle des »primären Magmas«; 4 – »basaltische« Ozeankruste; 5 – »granitische« Kontinentalkruste; 6 – Tiefseegraben; 7 – Subduktionszone mit andesitischem Vulkanismus; 8 – ozeanischer Intraplattenvulkanismus (basaltisch); 9 – ozeanische Riftzone mit basaltischem Vulkanismus; 10 – kontinentaler Riftvulkanismus

Nicht nur Erdbeben kennzeichnen die tektonisch aktiven Zonen der Erde, sondern die tiefreichenden Bruchsysteme ermöglichen den Aufstieg magmatischer Schmelzen und sind Bereiche eines tätigen, rezenten und subrezenten *Vulkanismus*. 62% aller heutigen Vulkane liegen im zirkumpazifischen Feuergürtel, davon 45% in den Inselbögen des westlichen Pazifiks und 17% in den Randgebieten Amerikas. Nur 24% sind nicht an ozeanische Inselgürtel gebunden. 83% aller tätigen Vulkane befinden sich auf den Kontinenten, 17% sind den Ozeanbecken zugeordnet. Über 20000 Seeberge und Guyots lehnen aber, daß besonders im Pazifik sehr viele erloschene Vulkane vorhanden sind, an Zahl weit mehr als auf dem Festland. Nach plattentektonischen Vorstellungen kann man vier Gruppen des *Vulkanismus* unterscheiden:

1. Vulkanismus der Riftzonen der mittelozeanischen Rücken, vorwiegend basaltisch, ausfließend (effusiv), un-

termeerisch, und auf den dazugehörigen Inseln (Island, Azoren);

2. Vulkanismus innerhalb ozeanischer Platten zwischen den mittelozeanischen Rücken und den Kontinentalrändern sowie Inselbögen, vorwiegend basaltisch, effusiv, an tiefreichende Bruchzonen der Tiefseebecken gebunden (Hawaii, Kapverden, Guyots);

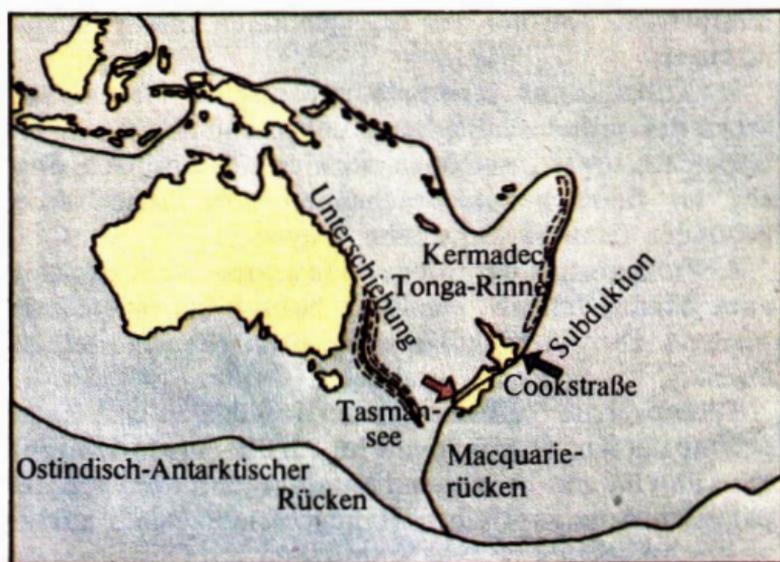
3. Vulkanismus der Subduktionszonen, stark explosiv, auch explosiv-effusiv, gemischt, basisch bis sauer, überwiegend aber intermediär andesitisch (Feuergürtel des Pazifiks, Westindien, Mittelmeer).

Dieser reiche Vulkanismus der Inselbögen und Randgebiete der Kontinente trennt im Pazifik eine innerpazifische Provinz mit vorwiegend basaltischen Laven von den pazifischen, andesitischen Randgebieten. Durch stufenweises Aufschmelzen und Vermischen von Gesteinsmaterial bei den Subduktionsvorgängen unter Zufuhr ozeanischer Massen entstehen granitische Magmen, die als große Tiefengesteinskörper (Plutone) in höhere Krustenteile zwischen andere Gesteinskomplexe eindringen. Steigen die Schmelzen bis zur Erdoberfläche auf, bilden sich parallel zu den Tiefseegesenken im Bereich der Inselbögen die charakteristischen Reihen aktiver Andesitvulkane wie in den südamerikanischen Anden, in Japan oder Indonesien. Daher spricht man von einer *Andesitlinie* oder einem Andesitgürtel. Die magmatischen Gesteine sind hier im Gegensatz zu den Basalten der atlantischen Ränder äußerst mannigfaltig. Man betrachtet diese Vorgänge als Entstehungsprozeß kontinentaler Lithosphäre.

Im einzelnen bestehen über den Vulkanismus der Subduktionszonen noch unterschiedliche Meinungen, zumal er recht variabel auftritt.

4. Kontinentaler Graben(Rift-)vulkanismus, explosiv-effusiver gemischter Vulkanismus (Afrikanisches Grabensystem, Kamerunberg), zum großen Teil mit dem Aufbrechen von Kontinenten infolge Dehnung verbunden.

Die größte Bedeutung hat zweifellos der ozeanische Riftvulkanismus, nicht nur quantitativ, sondern auch als ein Prozeß, der ozeanische Lithosphäre entstehen läßt. Es ist aber kaum richtig, wenn man den Riftvorgang mit der



*Neuseeland befindet sich an der Nahtstelle der Indisch-Australischen und der Pazifischen Platte. Beiderseits der Cookstraße werden die Inseln von zahlreichen aktiven Brüchen durchzogen, deren Bewegungen mit Erdbeben verbunden sind (nach Illies 1977).*

Förderung basischer Magmen als Motor der Bewegungen und die Kontinentverschiebung als Folge ansieht. Die Ursache der Drift dürfte vielmehr die Erdrotation sein, die als Hauptantriebskraft die Kontinentalverschiebung in Gang setzt und deren Wirkung die Riftprozesse mit dem ihnen eigenen Magmatismus sind (Brause 1980).

## Die Plattenränder

Wie die Verteilung der Erdbeben lehrt, ist tektonische Aktivität an die Ränder der Platten gebunden. Wenn sich Platten über der zähflüssigen Asthenosphäre bewegen, muß es zur Auflösung von Erdbeben und gleichzeitig zu vulkanischen Erscheinungen kommen. Drei unterschiedliche Plattenränder sind zu erkennen:

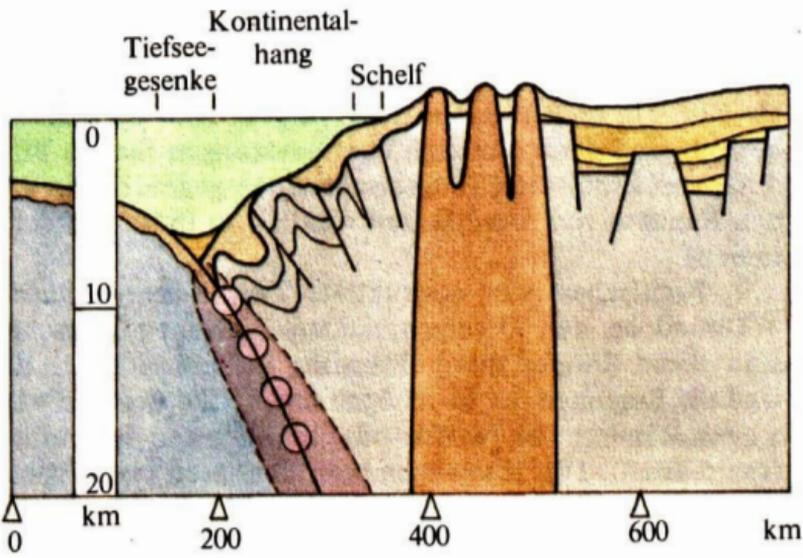
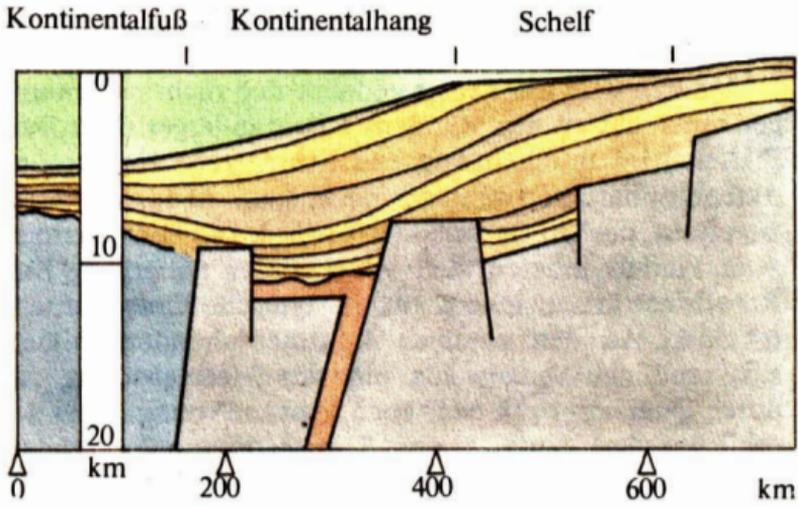
1. Atlantischer oder konstruktiver Typ, *Divergenzrand*, in Zusammenhang mit der Förderung von basaltischem

Mantelmaterial in den Riftzonen der mittelozeanischen Rücken stehend.

Dadurch wird die Kruste gedehnt und mehr oder weniger senkrecht zu den Rändern auseinandergerissen. Den Platten wird durch basaltische Schmelzen, die aus der Asthenosphäre fortwährend aufsteigen, neues Material zugeführt, das am Ozeanboden erstarrt. Die entstehenden zwei Platten müssen sich voneinander entfernen. Das Rote Meer kennzeichnet gut die typische Grabenbruchtektonik. An den passiven Kontinentalrändern bilden sich randliche Senken aus, einzelne Meeresbecken, die durch Querstörungen oder auch Vulkane voneinander geschieden sind. Unter ariden Klimabedingungen können Salzlagerstätten entstehen. Von den gehobenen Rändern wird sedimentäres Material infolge Verwitterung und Abtragung in den exogenen Bedingungen ausgesetzten Gebieten in die randlichen Flachmeergebiete verfrachtet. In längeren Zeiträumen kann das zur Anhäufung von mehr als 10000 m dicken Sedimenten führen. Hier im Schelfbereich sind dann günstige Voraussetzungen für die Bildung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten gegeben, wie an den Rändern von Atlantik und westlichem Indik (Vorderindien).

2. Pazifischer oder destruktiver Typ, *Konvergenzrand*. Während an den Divergenzrändern Dehnung herrscht, sind diese Ränder durch Pressung gekennzeichnet. Es sind die Regionen der Inselbögen und Tiefseegeesenke wie an den Rändern des Pazifiks oder im Südosten des Indiks (Indonesien). Die Inselbögen, von denen es zwei Typen gibt, intraozeanische und kontinentalrandliche Bögen, stellen ein frühes Entwicklungsstadium eines alpidischen Gebirges dar. Hier befinden sich die Subduktionszonen mit ihren tiefen Erdbeben.

3. Neben Divergenz- und Konvergenzrändern besteht eine dritte Form von Plattenrändern – wenn zwei Platten horizontal aneinander vorbeigleiten, so daß weder neue Platten entstehen noch vernichtet werden. Ein solcher *Scherungs- oder konservativer Rand* liegt z. B. an der Küste Kaliforniens vor. Doch wollen wir nicht verschweigen, daß es nicht immer gelingt, die Plattenränder eindeutig in das Schema einzugliedern.



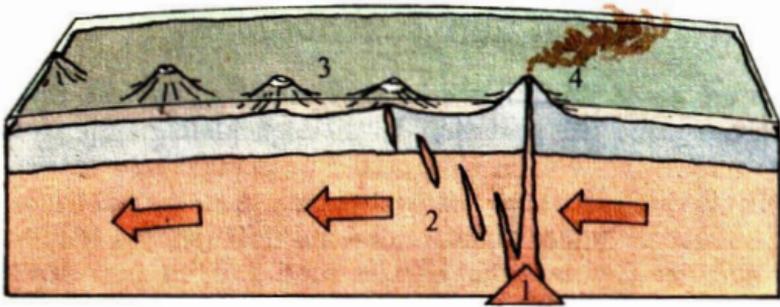
- |  |                     |   |                      |
|--|---------------------|---|----------------------|
|  | ozeanische Kruste   |  | Sedimente            |
|  | kontinentale Kruste |  | Gesteinsmetamorphose |
|  | Vulkanite           |  | Erdbebenherde        |

*Kontinentalrand des atlantischen (oben) und des pazifischen (darunter) Typs (nach Seibold 1973), stark schematisiert und etwa 18fach überhöht*

## Wärmebeulen und Tiefenbrüche

Es erscheint physikalisch kaum vorstellbar, daß die Erde ihre Wärme im gesamten Riftbereich gleichmäßig und gleichartig abgibt. Im Gegenteil, nur in einzelnen schmalen Bereichen steigt wahrscheinlich das magmatische Substrat als heißer Materiestrom aus dem tieferen Mantel mit einer Geschwindigkeit von rund 2 m im Jahr dom-(diapir-)artig in die Asthenosphäre auf und erreicht die Basis der Lithosphäre. Diese Gebilde sind nach T. Wilson eine Art Röhren, Schlote oder Kanäle von 100 bis 200 km Durchmesser und mögen mehr als 100 Millionen Jahre ortsfest und beständig bleiben. Man nennt sie *Wärmeröhren*, Mantel- oder Konvektionsbüschel (convection plumes, thermal plumes), die als *Wärmebeulen* oder *heiße Flecken* (hot spots) wahrnehmbar sind. Beispiele bilden nicht nur die Zentralgräben und Inseln wie Island, sondern auch landferne, an Tiefenbrüche innerhalb ozeanischer Platten gebundene Inseln wie Hawaii. Beim Emporsteigen der Schmelzen wird der Meeresboden um 1 bis 2 km und mit einer Breite um 100 km hochgehoben. Örtlich setzen Konvektionsströme die Lithosphäreplatten in Bewegung. Bisher kennt man mehr als fünfzig solcher heißer Flecken, die in Vulkanen einen vertikalen Aufstieg von Magma aus dem Mantel erkennen lassen.

Wilson hat das Alter der Vulkaninseln im Atlantik analysiert, die wie der Meeresboden und seine Sedimente mit zunehmender Entfernung von den mittelozeanischen Rücken älter werden. Das schon klassische Beispiel stellt die Nordwest-Südost verlaufende Kette der Hawaii-Inseln dar, die sich über 2600 km ausdehnt – von Hawaii ganz im Südosten nach Nordwesten über untermeerische alte Vulkane und Inseln bis zum erloschenen, etwa 70 Millionen Jahre alten Unterwasservulkan Meiji. Nach Südosten zu werden die Inseln jünger, und der aktive Vulkanismus ist gegenwärtig (1984) auf die jüngste Insel Hawaii mit ihren Vulkanen Kilauea und Mauna Loa beschränkt. Während die Wärmebeule an Ort und Stelle geblieben ist, hat sich die pazifische Lithosphäreplatte unablässig nach Nordwesten verschoben, so daß ständig neue Plattenbereiche über den heißen Flecken zu liegen kamen.



Stationäres Mantelbüschel – auch Wärmebeule genannt (1) – und driftende Lithosphärenplatte (2). 3 – zunehmend ältere erloschene Vulkane; 4 – aktiver Vulkan

Auch Hawaii verlagert sich mit etwa 9 cm jährlich weiter nach Nordwesten. Andere Wärmebeulen sollen im Afardreieck am Süden des Roten Meeres, im Yellowstonepark der USA mit seinen Geysiren, unter Island, den Kanarischen Inseln, den Azoren, St. Helena, der Insel Réunion im Indischen Ozean und den Galapagosinseln im äquatorialen Pazifik, etwa 1000 km von der Küste Ekuadors entfernt, vorhanden sein.

Ungeklärt erscheint die Frage, ob die »hot spots« den Motor der Plattenbewegung bilden, oder ob man sie als deren Anker betrachten muß.

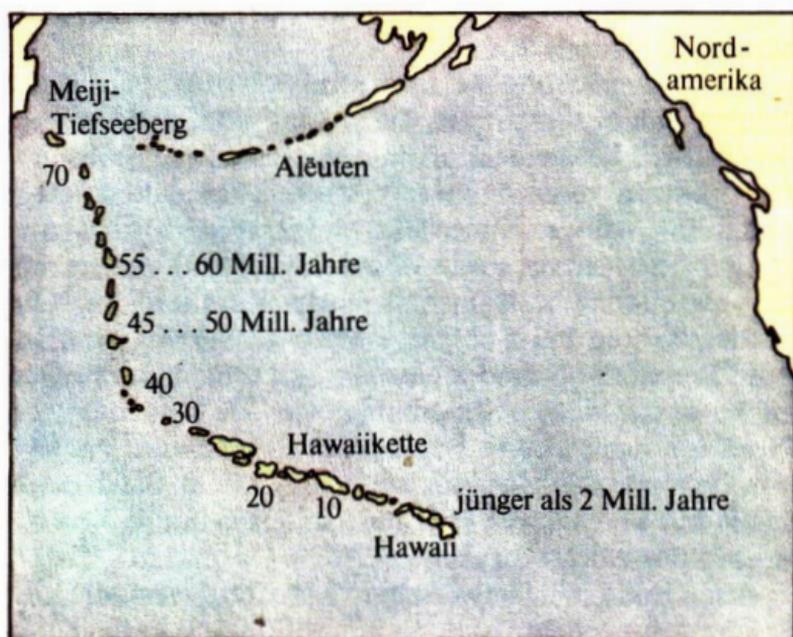
Auch in der geologischen Vergangenheit hat es Wärmebeulen gegeben, die z. B. die Entwicklung des Rheingrabens eingeleitet haben.

Wärmebeulen und heiße Flecken als Aufwölbungen der Asthenosphäre führen zur Entwicklung von *Tiefenbrüchen* (Riften), die im Laufe der Zeit auseinanderdriften können. Meist kommt es zu Strukturen, die an drei Gräben entlang zerrissen werden und dabei im Idealfall einen Winkel von  $120^\circ$  bilden. Oft sind nur zwei Arme solcher weit verbreiteten *Dreispalten-*(oder auch *Drillings-*)*strukturen* (triple junctions) aktive Plattengrenzen, während der dritte, »schwache« Ast lediglich kürzere Zeit wirksam ist. Es gibt auch Gebilde mit zwei oder vier Ästen sowie solche mit zwei Armen in einer geraden Linie und einem dritten in stumpfem Winkel dazu.

Riftstrukturen scheinen vorwiegend an altangelegten

Schwächezonen der Lithosphäre zu entstehen und immer wieder von neuem reaktiviert zu werden, wie die mehrfache Öffnung des Atlantiks zu beweisen scheint. Die bekannteste Region auf der Erde, die ein Aufbrechen der Lithosphäre mit Vulkanismus, heißen Quellen und Erdbeben anschaulich zeigt, ist neben dem Rift des Mittelatlantischen Rückens mit Island das von Rissen und Gräben durchzogene Afardreieck am südlichen Ende des Roten Meeres. Schon Wegener hatte darauf aufmerksam gemacht, daß im Afar ein Gebiet vorliegt, das sich von Ostafrika nach Norden erstreckt und sich zu einer Bruchzone im Roten Meer und im Golf von Aden erweitert. Im Afar sind drei Platten vorhanden – Arabia, Somalia und Nubia –, in deren Verbindung sich drei Tiefenbruchsysteme überschneiden, von Nordnordost nach Westsüdwest der afrikanisch-äthiopische Graben, von Ost nach West der Golf von Aden und von Nordnordwest nach Südsüdost das Rote Meer. In der Verlängerung nach

*Die Entwicklung der Hawaii-Inselkette in Zusammenhang mit der Vorstellung eines stationären heißen Fleckens (nach Wilson und Morgan 1971)*



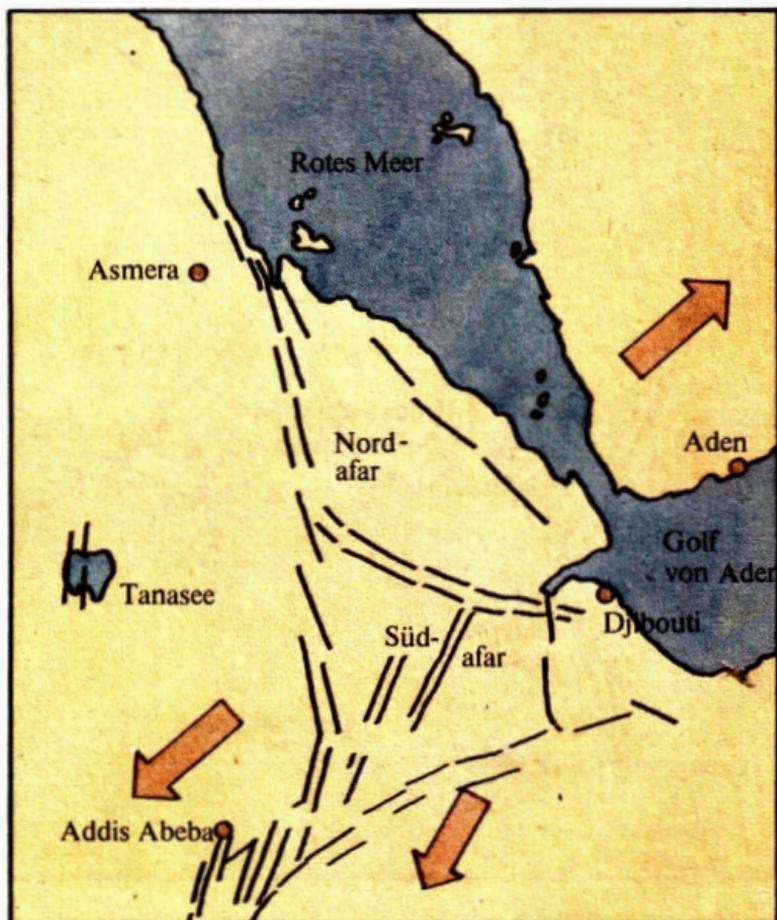
Nordosten bildet der Graben des Toten Meeres die Grenze zwischen der Arabischen und Nubischen Platte, der im ersten Entwicklungsstadium des Roten Meeres die Rolle einer Transformstörung gespielt haben soll.

Die einen meinen, hier sei das einzige Gebiet auf der Erde, in dem man eine aktive Plattentrennung und -verschiebung trotz im einzelnen unterschiedlicher Krustendehnungsbeträge untersuchen könne und ein atlantischer, aktiver Kontinentalrand in ein ozeanisches Rift verwandelt werde. Andere verneinen das und sagen, daß die Vorgänge und Erscheinungen im Afar nicht mit der Ausweitung der Ozeanböden verglichen werden könnten.

Es ist fraglich, ob trotz eines vorwiegend basaltischen Vulkanismus ozeanischer Art mit eingeschalteten sauren Vulkaniten und trotz häufiger Erdbeben Afar, das sich im Mittel nur um 6 mm jährlich erweitert, nicht lediglich die Verbindung zwischen Rotem Meer und dem Golf von Aden bildet. Es ist strittig, ob das gesamte Rote Meer durch Ozeanbodenausweitung entstanden ist und sein Boden aus ozeanischer Lithosphäre besteht oder ob, abgesehen vom Rift des zentralen Rückens mit einer jetzigen Dehnungsrate von 0,9 bis 1 cm im Jahr, der von mächtigen sedimentären Ablagerungen bedeckte flachere Meeresboden westlich und östlich des Grabenbruchs nicht noch kontinentale Kruste ist.

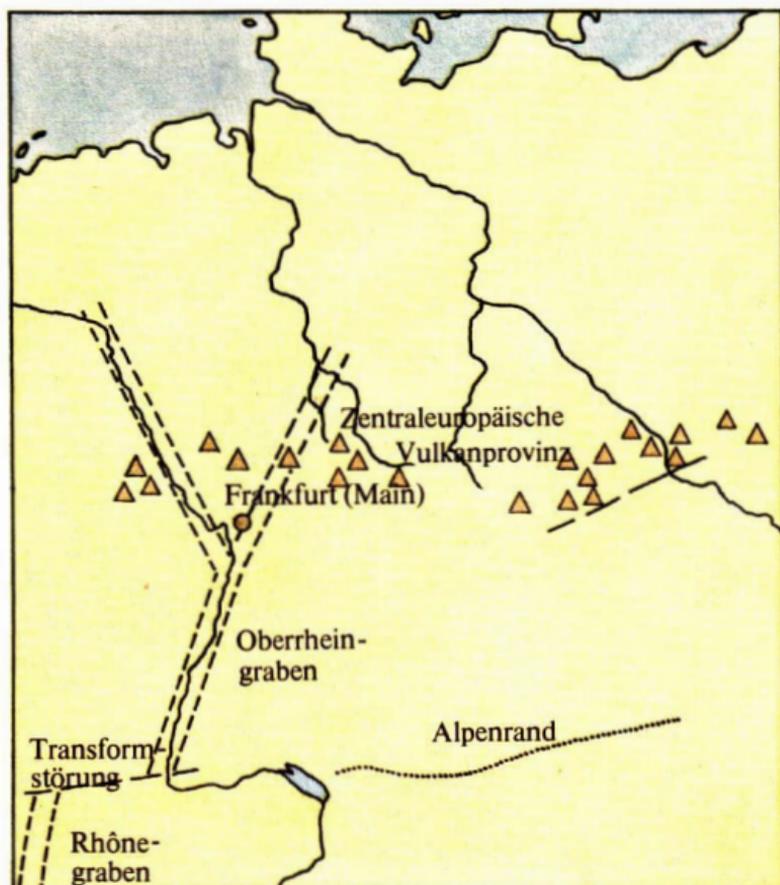
Die Untersuchung weiterer Dreispaltenstrukturen hat gelehrt, daß es solche gibt, die so jung sind, daß ein Aufbrechen der Kruste noch nicht erfolgt ist. Dazu gehört unter anderen der Frankfurt (Main)-Dreispaltenknotenpunkt mit seinen Ästen Oberrheingraben, Mittel- und Niederrheinstruktur sowie Hessische Senke/Leinegraben. Der eiszeitliche Vulkanismus in der Eifel und im Neuwieder Becken bei Koblenz, dessen Zeuge vor zehntausend Jahren der Neandertaler war, mit seinen Nachwehen in Form zahlreicher Thermalquellen hat besonders von Nordwest nach Südost verlaufende Brüche zum Aufsteigen benutzt. Die Struktur setzt sich bis in die Niederlande fort und mündet über die Zuidersee in den Zentralgraben des Nordseebeckens.

Auf Grund der seismischen Aktivität, rezenter Krustebewegungen und abnorm hoher Erdwärme wäre denk-



Das Afardreieck (Dreispaltenstruktur) im Ostafrikanischen Grabensystem (nach Pilger 1975)

bar, daß auch der Eifelvulkanismus eines Tages erneut reaktiviert werden könnte, ähnlich wie der Mt. St. Helens in Nordamerika. Der junge Vulkanismus findet sich nicht nur im Rheingebiet, sondern begleitet in rund 200 bis 350 km Entfernung den Alpen- und Karpatenrand vom Französischen Zentralplateau über Vogelsberg und Rhön, Nordböhmen und die Sudeten. Die jüngsten, eiszeitlichen Vulkane finden sich im Westen in der Eifel, nach Osten zu werden die Basalte immer älter, bis um 30 Millionen Jahre.



*Die Frankfurt (Main)-Dreispaltenstruktur mit ihren Armen und Vulkangebieten (nach Thierbach 1975)*

Haben wir vielleicht wie auf Hawaii eine stationäre Wärmebeule vor uns, und Europa wird vom Atlantik aus nach Osten verschoben? Ähnliche Erscheinungen lassen sich weltweit feststellen, wie in den Gräben Afrikas und Arabiens und den asiatischen jungen Faltegebirgen des Alpen-Himalaja-Bereiches. Offenbar besteht ein generelles Wechselspiel zwischen der Massenverdrängung längs der Alpen-Himalaja-Kollision und dem Mantelauftrieb der kontinentalen Gräben in den Vorländern diesseits und jenseits der mediterranen Plattengrenze (Illies 1975). Jede Kollision von Großplatten ruft aber innerhalb der Platten eine Intraplattentektonik hervor.

---

# Das Alter der Ozeanböden

---

## Mysteriöse magnetische Streifen

Sind die Vorstellungen der Plattentektonik richtig, müßten beispielsweise im Atlantik westlich und östlich von der Zentralspalte des Rückens in Richtung auf Amerika und Europa zu immer ältere Lithosphärestücke vorhanden sein, am Rücken selbst aber die jüngsten Bildungen. Ist das zu belegen?

Zunächst müssen wir uns etwas mit dem Magnetfeld der Erde befassen. Das Magnetfeld besitzt einen Dipolcharakter, es hat einen Nord- und einen Südpol. Dabei darf man davon ausgehen, daß die magnetischen und geographischen Pole der Erde auch in der erdgeschichtlichen Vergangenheit eng benachbart gelegen haben.

Bei magnetischen Untersuchungen an Gesteinen zeigte sich die überraschende Tatsache, daß rund die Hälfte im Vergleich mit dem jetzigen Magnetfeld der Erde entgegengesetzt magnetisiert war. Das Magnetfeld hat sich also im Laufe der Erdgeschichte wiederholt umgepolt.

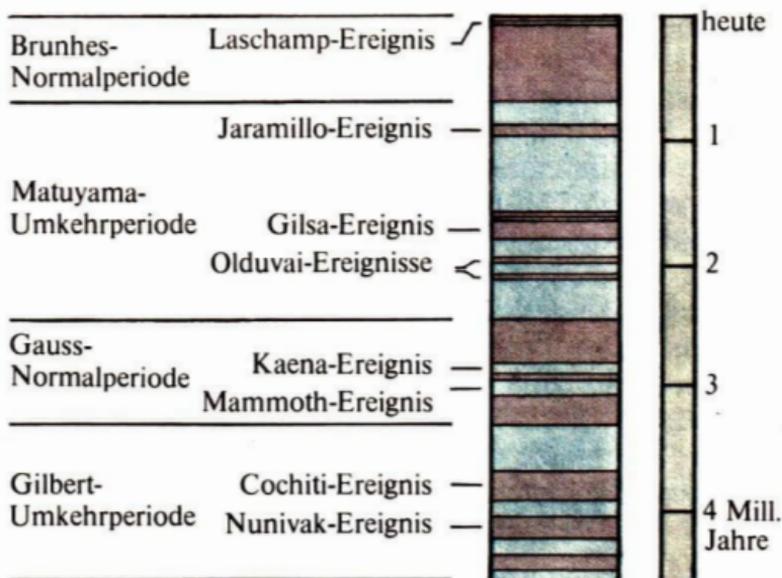
Man unterscheidet eine normale, den heutigen Verhältnissen entsprechende und eine umgekehrte, entgegengesetzte (inverse) Magnetisierung. Es gibt Polaritätsepochen mit einer langandauernden umgekehrten Magnetisierung, die durch kurzfristige Umpolungsvorgänge von unterschiedlicher Zeitdauer unterbrochen werden. Eine solche Umpolung geht in einer Größenordnung von rund 10000 Jahren oder auch länger vor sich. Für die letzten 4,5 Millionen Jahre wurden allein 26 Umpolungen in vier Polaritätsepochen, für 76 Millionen Jahre im Südpazifischen Rücken 171 Umpolungen festgestellt. Da seit

1835 das Magnetfeld der Erde schwächer wird, nimmt man an, daß in rund 2000 Jahren eine Selbstumkehr beginnen könnte, zumal die geologische Neuzeit seit 65 Millionen Jahren bisher eine Periode häufiger Umpolungen gewesen ist.

Die Ursache für das geomagnetische Hauptfeld und die Umpolungen ist bis heute nicht eindeutig geklärt, wenn man auch zu wissen glaubt, daß dafür Bewegungen elektrisch leitender Materie im äußeren, flüssigen Erdkern verantwortlich sind (Dynamotheorie).

Wenn aus dem Mantel aufsteigende basaltische Schmelzen oder Ablagerungen am Meeresboden ferrimagnetische Eisenminerale, besonders Magnetit, enthalten, richten sich diese Partikel bei der Erstarrung der Schmelze infolge Abkühlung unter 575°C, dem Curiepunkt, oder in den Sedimenten nach dem herrschenden Magnetfeld aus. Man spricht von *Thermoremanenz* und *Sedimentationsremanenz*, von einer Restmagnetisierung der Gesteine, die nur dann ausgelöscht wird, wenn die Gesteine im Rahmen von tektonischen Bewegungen über den Curiepunkt hinaus wieder erwärmt werden. Die Gesteine tragen also »Erinnerung mit sich«, indem sich die ferrimagnetischen Minerale wie eine Kompaßnadel einstellen. Das herrschende Magnetfeld wird sozusagen über Hunderte von Jahrmillionen eingefroren.

Diese Erkenntnisse des *Paläomagnetismus* sind zu einem der umwälzendsten Ergebnisse der Geologie geworden. Durch die Ausbreitung des Meeresbodens werden, wie wir gehört haben, die Gesteinsserien von der Zentralzone der Rücken aus ständig getrennt, die – nach beiden Seiten verfrachtet – sich spiegelbildlich entsprechen. Die paläomagnetische Analyse lehrt, daß sich abwechselnd auf beiden Seiten der Rücken ein paralleles symmetrisches Zebromuster ergibt, indem gesetzmäßig Komplexe mit normaler und solche mit inverser Magnetisierung nebeneinanderliegen. Das gleiche Bild zeigt sich bei übereinanderlagernden basaltischen Deckenergüssen, die man auf Island mittels Tiefbohrungen untersucht hat. So haben wir die schrittweise Aufzeichnung der Ozeanbodenspreizung über paläomagnetische Befunde vor uns. Bei Messungen mit Magnetometern, die von Forschungs-



*Geomagnetische Zeitskala der Umkehrung des erdmagnetischen Feldes während der letzten 4,5 Millionen Jahre. Die Perioden wurden nach berühmten Forschern des Erdmagnetismus, die Ereignisse nach Lokalitäten auf der Erde benannt. Violett: normale Polarität; hellblau: umgekehrte Polarität*

schiffen über den Ozeanboden geschleppt wurden, erkannte man im Atlantik, Indik und Pazifik lange Streifen mit unterschiedlicher – stärkerer und schwächerer – Magnetisierung, die mehrere tausend Kilometer lang, aber nur wenige Kilometer, selten bis zu 100 km breit sind.

Diese Entdeckung des 25 Jahre alten Geologiestudenten F. Vine aus Cambridge im Jahre 1963 und seines älteren Kollegen D. Matthews erregte weltweit Aufsehen, hat aber auch – wie sollte es anders sein? – Kritiker auf den Plan gerufen. Die überwiegende Mehrzahl der Geowissenschaftler ist von der Richtigkeit der eindrucksvollen Entdeckung von Vine und Matthews überzeugt. Viele sehen darin keine Hypothese mehr, sondern eine Tatsache, die für die Deutung der globaltektonischen Prozesse grundlegende Bedeutung erlangt hat. Freilich sind die *Streifenmuster* nicht überall so zwingend wie bei einer Reihe veröffentlichter Bilder.

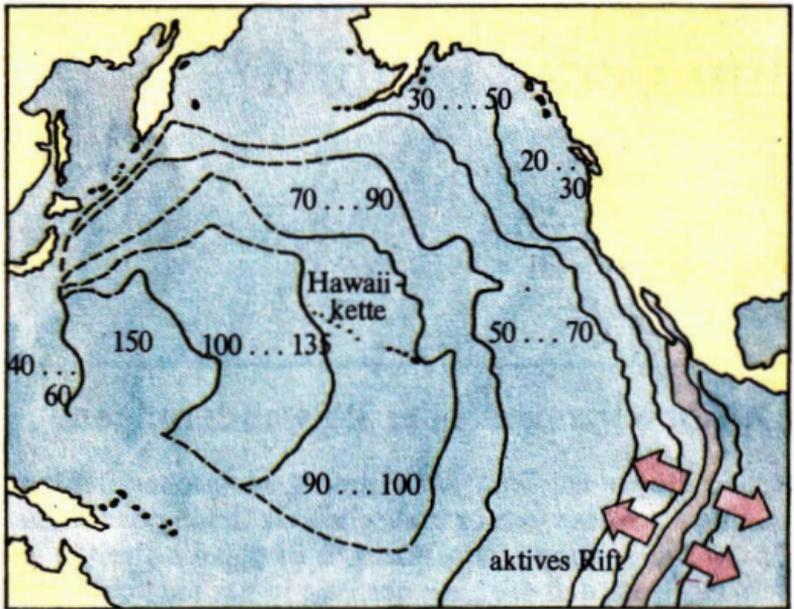
Seit 1969 wurden umfangreiche Forschungen durchge-

führt, die die Richtigkeit der Vineschen Beobachtungen zu bestätigen scheinen. Ein Vergleich der horizontalen Streifenmuster und der übereinanderlagernden Basaltdecken auf Island und den Kontinenten zeigt eine erstaunliche Übereinstimmung. Man hat registrieren können, daß in den letzten 65 Millionen Jahren – also seit Beginn der erdgeschichtlichen Neuzeit – die Hälfte des heutigen Meeresbodens mit Ausbreitungsraten von etwa 3 cm (teilweise bis zu 12 cm) jährlich nach jeder Seite der Rücken (insgesamt also 6 cm jährlich) neu gebildet worden ist. Das macht ein Drittel der Erdoberfläche aus. Gegenwärtig beträgt die jährliche Gesamterzeugung an neuer ozeanischer Lithosphäre rund 2,5 Millionen km<sup>3</sup>. Nach anderen Angaben schwankt sie zwischen 1,5 und 4 km<sup>3</sup>, die in den Subduktionszonen der Tiefseegeesenke auf der anderen Seite wieder verschluckt werden müssen.

Auf Grund der Befunde hat man eine geomagnetische Zeitskala aufstellen können und die einzelnen Polaritätsepochen nach bedeutenden Erforschern des Erdmagnetismus benannt (siehe Abb. auf S. 89). Man hat Umpolungen des erdmagnetischen Feldes über die geologische Neuzeit hinaus rückwärts für ältere Systeme wie Trias (mittleres Mesozoikum), Perm (Jungpaläozoikum) und sogar das Präkambrium nachweisen können. Die magnetische Intensität ist danach in den verschiedenen Zeiten recht unterschiedlich gewesen.

## Wie alt sind die Ablagerungen?

Die durch paläomagnetische Befunde an den Basalten gestützte Vorstellung von der Ausbreitung des Meeresbodens wird auch von den dort abgelagerten Sedimenten bestätigt. Die ältesten bis jetzt bekannten Ablagerungen im Atlantik und im nördlichen Pazifik, die auf ozeanischen Basaltgesteinen lagern, gehören mit einem Alter von 165 Millionen Jahren dem Oberen Jura (Oxford) an. Mikroskopische Untersuchungen kleiner Organismenreste im westlichen Atlantik nahe der nordamerikanischen Küste bei den Bermudas und im Osten auf den Kanarischen Inseln sowie unweit des Hafens Dakar (Senegal) haben



*Das Alter des Meeresbodens im Nordpazifik in Millionen Jahren (nach Sullivan 1980)*

das bestätigt. In Richtung auf die Rücken finden sich bei zunehmender Mächtigkeit immer jüngere Schichten, solche der Unteren und Oberen Kreidezeit, des Alt- und Jungtertiärs und schließlich des Quartärs. In den aktiven Kammregionen der Rücken fehlen Sedimente im allgemeinen, und ihre beiderseits der Kammregion geringen Mächtigkeiten spiegeln ebenfalls das junge Alter des Meeresbodens wider. Im Indik lagern die ältesten Bildungen nahe Australien, sie gehören mit 140 Millionen Jahren der Unteren Kreide an. Danach ist das Alter des Bodens im Atlantik seit dem mittleren, im Indik erst seit dem oberen Mesozoikum nachgewiesen. Die paläomagnetischen Befunde und das Ergebnis der mikropaläontologischen Untersuchungen der Sedimente stimmen also überein, so daß sich die geomagnetische und die geochronologische Zeitskala auf der Grundlage der Entwicklung der Lebewesen ausgezeichnet ergänzen. Beide bilden wichtige Eckpfeiler der Plattentektonik. Vor rund 200 Millionen Jahren gab es also noch keinen Atlantik und auch keinen Indik!

---

# Ein neues Erdbild?

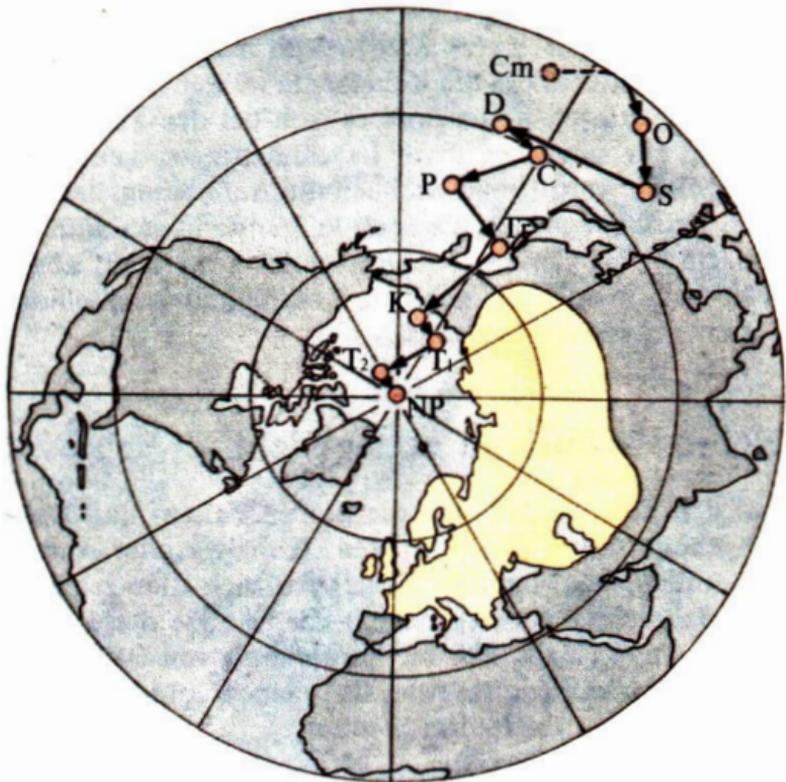
---

## Driftbewegungen oder Polwanderungen?

Schon länger hat man auf Grund geologischer Befunde wie Vereisungsspuren in tropischen Gebieten oder Kohleflözen mit subtropischen Pflanzen in polaren Breiten geschlossen, daß die Lage der Pole in der erdgeschichtlichen Vergangenheit eine andere gewesen sein muß als in der Gegenwart. Mit den Polen hätten sich auch die Klimagürtel der Erde verlagert. Paläomagnetische Messungen und deren statistische Auswertung lehren, daß die Richtung der Magnetisierung in den Gesteinen örtlich und zeitlich voneinander abweicht. Das erdmagnetische Feld hat sich im Laufe der Zeit verändert. Man konnte die Lage der Kontinente zu den Polen und zum Äquator für die einzelnen Systeme der Erdgeschichte sowie die Konfiguration der Kontinentalschollen in der Vergangenheit auf einem Globus eintragen. Dabei ergab sich eine Polwanderungskurve, wie sie Runcorn vom Kambrium bis zum Tertiär entworfen hat.

Doch es wäre denkbar, daß es sich nur um scheinbare Polverlagerungen handelt, weil sich in mobilistischem Sinne die Kontinente zueinander als auch absolut zu den Polen verschoben haben.

Paläomagnetische Befunde in geologisch altersgleichen Gesteinsserien verschiedener Kontinente erbrachten das überraschende Ergebnis, daß sich unterschiedliche Pol-Lagen ergaben. Dies scheint ein schöner Beweis für Drift und zusätzliche Drehbewegungen einzelner Großschollen zu sein. Beispielsweise wurden bei Messungen in Europa und Nordamerika abweichende Pol-Lagen festgestellt, die



*Wahrscheinliche Polwanderung, bezogen auf den eurasischen Kontinent. Cm – Kambrium; O – Ordovizium; S – Silur; D – Devon; C – Karbon; P – Perm; Tr – Trias; K – Kreide; T<sub>1</sub> – Alttertiär T<sub>2</sub> – Jungtertiär; NP – Nordpol heute*

man durch eine Verschiebung Europas um 30° gegen Nordamerika zur Deckung bringen konnte. Magnetometermessungen in etwa 200 Millionen Jahren alten Sandsteinen und Steinkohlenbildungen erbrachten das Ergebnis, daß sich England um rund 34° im Uhrzeigersinn nach Osten verlagert, daß es früher im Süden in Äquatornähe gelegen und sich dann in nördlicher Richtung bewegt hat.

Ähnliche Befunde ergaben Messungen in Vorderindien und Australien. In 100 Millionen Jahren ist Indien 7000 km nach Norden gewandert. Die für die Ausbreitung des Meeresbodens sprechenden Argumente bilden eine wesentliche Stütze für die zunächst von vielen Geo-

wissenschaftlern skeptisch aufgenommenen Untersuchungsergebnisse. Kurze Zeit meinte man, daß sich die Pole und später allein die Kontinente während der Erdgeschichte verlagert hätten und es sich bei den Polwanderungen nur um scheinbare Lageänderungen gehandelt habe. Heute vertritt man vielfach die Auffassung, daß sowohl Driftbewegungen als auch Polwanderungen vorhanden sind. Die Diskussion darüber ist noch nicht abgeschlossen, wenn auch wohl die Kontinentalverschiebung der entscheidende Faktor ist.

## Gebirgsbildung in neuer Sicht

Auf den Kontinenten sind die großen Falten- und Deckengebirge wie Alpen, Karpaten, Himalaja oder Anden die auffälligsten Gebilde. Daher hat sich die Geologie viele Jahrzehnte vorwiegend mit der Analyse dieser Erdkrustentypen befaßt. Bei der Entwicklung von Orogenen<sup>1</sup> als in Teilstücke gegliederten Bauelementen der Erdkruste unterscheidet man drei Stadien:

1. das *Geosynklinalstadium* als Vorbedingung für die Faltengebirgsbildung.

In großen, sich in langen Zeiträumen von mehr als 100 Millionen Jahren unterschiedlich vertiefenden, langen und weniger breiten Meeresbecken werden durch Abtragung auf den umgebenden Festländern oft mehr als 6000 m mächtige Ablagerungen angehäuft. Ein zum Teil lebhafter basischer bis intermediärer Vulkanismus ist untermeerisch vorhanden. Es scheint, als ob die Anlage der Geosynklinale an Schwächezonen der Lithosphäre, insbesondere an Tiefseerinnen, gebunden ist.

2. die eigentliche Gebirgsbildung oder *Tektonogenese*, die zur strukturellen Umgestaltung führt.

Die horizontal abgelagerten Gesteinsserien mit zwischengeschalteten Magmatiten werden durch tektonische Kräfte unter Verkürzung ihrer Ausdehnung zusammen- und übereinandergeschoben. Sie wachsen dadurch in

<sup>1</sup> grch. oros, Gebirge; in Teilstücke gegliederte Bauelemente der Erdkruste

ihrer vertikalen Erstreckung an, so daß das Ergebnis eine Verdickung der Kruste ist. Die Einengungsbeträge liegen bei rund 2 bis 3 mm jährlich. Die Krustenverkürzung erreicht z. B. im Himalaja etwa 500 km.

3. stufenweise *Heraushebung* des Komplexes aus dem Meer und Umgestaltung zu einem Gebirge in geographisch-morphologischem Sinne, das man als *Morphogen*<sup>1</sup> bezeichnet.

Die drei Stadien sind eng miteinander verknüpft, und die strukturelle Umgestaltung geht im einzelnen differenziert und ohne scharfe Grenzen vor sich.

Jede Verkürzung und Einengung von Krustenteilen muß notwendig Zerrung und Ausweitung auf der anderen Seite zur Folge haben, wenn die Erde nicht expandieren soll. Die Plattentektonik hat viele neue Gesichtspunkte gebracht, ohne daß die Lehre von den Geosynklinalen etwa veraltet wäre und nunmehr sogar aufgegeben werden müßte, wie übereifrige, »moderne« Dogmatiker behaupten.

Neuerdings ist erfolgreich versucht worden, die klassischen Anschauungen über Entstehung und Entwicklung der Geosynklinalen mit den Elementen der Plattentektonik zu verknüpfen. Das Ziel muß sein, zukünftig die Elemente der auf den Kontinenten entwickelten Vorstellungen von den Geosynklinalen sinnvoll mit den Elementen der neuen Globaltektonik zu einer Synthese zu verbinden.

Es konnte gezeigt werden, daß es nicht richtig ist, die Gebirgsbildung auf der Grundlage *eines* deterministischen Modells zu analysieren. Es gibt vielmehr mehrere Möglichkeiten der Tektonogenese im Sinne einer Reihe unregelmäßig aufeinanderfolgender dynamischer Vorgänge. Plattentektonisch existieren im Grunde vier Wege:

1. Zwei kontinentale Lithosphäreplatten bewegen sich periodisch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aufeinander zu, z. B. Vorderindien und Asien oder Afrika und Europa.

Bei der Kollision bzw. dann, wenn eine kontinentale

<sup>1</sup> grch. *morphe*, Gestalt

Platte über eine andere gleitet, muß sich eine bedeutende Einengung ergeben. Der Ozeanboden zwischen den Platten bewegt sich gegen den Kontinent und staucht ihn unterschiedlich auf, wie im Himalaja an der Nahtstelle von Indien und Eurasien oder in den Alpen, bis das Meer austrocknet. Auf diese Weise war es vor etwa 45 Millionen Jahren weitgehend verschwunden. Die heute etwa 150 km breiten Alpen waren vor der Einengung zwischen 300 und 600 km breit.

Ähnliche Vorgänge laufen vor unseren Augen im Gebiet zwischen Australien und Indonesien ab. Die zahlreichen Inseln und randlichen Gebirge, Vulkane und Erdbeben sind Zeugen dafür, daß plattentektonische Prozesse vor sich gehen. Wir bezeichnen diese Art eines plattentektonischen Prozesses als *Himalajotyp*.

2. Im Gebiet eines Inselbogens bewegen sich eine ozeanische und eine kontinentale Platte aufeinander zu. Die eine schiebt sich unter die andere wie am Rand von Ostasien. Dieser Weg heißt *Japantyp*.

3. Am Rand eines Kontinents wird eine kontinentale Platte auf eine ozeanische aufgeschoben oder die ozeanische unter die kontinentale untergeschoben wie in Südamerika. Hier hat die Unterschiebung vor 200 Millionen Jahren eingesetzt – bei einer Stärke der Pazifikplatte von rund 50 km und der darübergeschobenen Südamerikaplatte von 200 bis 300 km. Wir sprechen hier vom *Kordilleren- oder Andentyp*.

4. Im Grenzbereich zwischen einer kontinentalen Platte und einem Inselbogen kommt es zum Versinken der ozeanischen Plattenanteile und zur Angliederung des Inselbogens an die Gegenplatte. Dieser Fall tritt uns beim *Neuguineatyp* entgegen.

So gesehen, sind die Gebirgsgürtel der Erde eine logische Folge plattentektonischer Prozesse. Das Werden und Vergehen der Platten – die gesamte Entwicklung – sind in dialektischem Sinne gesetzmäßig verbunden. Lithosphärenplatten entstehen, vergrößern oder verkleinern sich, driften und wandern, bis sie am Ende ihres Weges im Mantel verschwinden und vergehen. Ob sich ein Ozean ausbreitet oder ob er schrumpft, hängt davon ab, ob die Neubildung ozeanischer Lithosphäre – wie im Atlantik –

größer ist als die Verschluckung, wie im Pazifik. Als Folge einer Riftbildung in einem Kontinent erscheinen die ozeanischen Schwellen, die den Zerfall des Kontinents einleiten. Wenn auch bei diesen Vorgängen bezüglich Ursache und Wirkung nicht immer alles klar ist, umfaßt der Vorgang des Werdens und Vergehens von Platten Zeiträume zwischen 170 und 200 Jahrmillionen. Dieser Wert stimmt gut mit dem Abstand der großen Gebirgsbildungen der Erdgeschichte wie der variszischen und alpidischen überein. Nach den sowjetischen Geologen W. E. Chain, Maksimov und anderen gibt es tektonische Kleinzyklen mit einer Dauer von 40 bis 45, Großzyklen mit 150 bis 200 und Megazyklen mit 180 bis 600 Millionen Jahren. In einer Reihe von Räumen kann es somit zu einer Überlagerung tektonischer Epochen kommen.

## Intraplattentektonik

Bisher haben wir uns mit den wenigen Großplatten der Lithosphäre beschäftigt, aber schon gesagt, daß es außerdem eine Reihe kleinerer Platten gibt und die Kontinente aus vielen Einzelplatten bestehen. Damit stehen wir vor der Frage, wie sich die tektonische Entwicklung innerhalb der großen Platten vollzieht, die oft genug aus ganz unterschiedlichen Strukturelementen zusammengesetzt sind. Zur Erforschung dieser *Intraplattentektonik* wurden insbesondere Untersuchungen im kompliziert gebauten Mitteleuropa durchgeführt, so im Bereich des Oberrheingrabens, einer zentralen Bruchstruktur infolge extremer Zerrungsvorgänge, und in den Alpen, die als klassisches Beispiel extremer Kompression gelten. In der DDR hat sich eine Reihe jüngerer Forscher mit ähnlichen Fragen im alten Gebirge befaßt und innerhalb der globalen Vorgänge differenzierte Bewegungsbilder abgeleitet.

Das junge Faltengebirge der Alpen und der Oberrheingraben erscheinen bezüglich ihrer tektonischen Deformation als Gegenstück. Die Alpen verdanken ihre Entstehung der Plattenkollision Eurasiens mit Afrika und sind Teil eines großen Faltengebirgsgürtels. Der Rheingraben erscheint als das zentrale Glied der mächtigen Graben-

strukturen, die sich von der Nordsee bis zum Mittelmeer erstrecken.

Es scheint zunächst, als ob beide Großstrukturen voneinander unabhängige, eigenständige Gebilde sind. Vergleicht man aber auf der Grundlage exakter Altersbestimmungen die Entwicklungsphasen beider Bereiche miteinander, können (nach Illies) gemeinsame Züge nicht bestritten werden.

Die Taphrogenese des Rheingrabens ist das Ergebnis eines Wechselspiels zwischen Vorgängen im oberen Erdmantel und in der Erdkruste. Der Graben ist mit dem Aufdringen von Mantelmaterial in die überlagernden Schichten – mit einer weitgespannten Aufwölbung des Erdmantels – verbunden. Die Kruste-Mantel-Grenze steigt im braunkohlenzeitlichen Vulkan des Kaiserstuhls bei Freiburg (Breisgau) bis 24 km Tiefe an. Von dieser Wärmebeule aus ist die Kruste aufgerissen und hat die Grabenentwicklung eingesetzt.

Vergleicht man die alpinen Einengungsphasen mit dem Geschehen im Graben, ergeben sich verblüffende Übereinstimmungen. Im Gegensatz zum Rheingraben taucht die Kruste-Mantel-Grenze unterhalb der Alpen bis rund 60 km ab. Sicherlich besteht ein Zusammenhang zwischen dem Absinken dieser Grenze und der Aufwölbung des Grabens. Die Alpenfaltung als ein A-Subduktionsvorgang (vgl. S. 62) und die Aufwölbung des Mantels im Vorland der Alpen sind gleichzeitige, eng benachbarte Prozesse. Die in den Alpen abtauchende Asthenosphäre stieg unterhalb des Grabens wieder auf und führte zu einer Zerrung und zum Zerschneiden der stabilen Kruste.

## Ein Superkontinent zerfällt

Die Ähnlichkeit der Küsten Afrikas und Südamerikas, verwandte, sich ergänzende geologische Strukturen, die gleichen Schichten mit nur ihnen eigentümlichen Pflanzen und Landreptilien, gleichartige, einförmige basaltische Ergüsse und einheitliche Spuren und Ablagerungen einer jungpaläozoischen Eiszeit hatten Alfred Wegener zu der Schlußfolgerung veranlaßt, daß beide Kontinente

ursprünglich ein Ganzes gewesen seien. Die Forschungen führten zu der Vorstellung, ehemals habe ein riesiger geschlossener Kontinent, die *Pangaea*, existiert, der zerbrochen sei und sich auch weiterhin auflöse. Er habe der einst eine Fläche eingenommen, die der aller gegenwärtiger Kontinente zusammen entsprach.

Ausgehend von den Erkenntnissen der Plattentektonik und vom Alter der Ozeanböden, haben Dietz und Holden (1970) den Gedanken Wegeners aufgegriffen und ein physikalisch besser begründetes Bild entworfen. Nach ihrer Auffassung bestanden vor 225 Millionen Jahren die universale Landmasse der *Pangaea*, eine gewaltige Großplatte, und ein riesiges Weltmeer, die *Panthalassa*, der Ganzozean, als Vorläufer des heutigen Pazifiks. Vor 180 Millionen Jahren, im Mittleren Jura, begann der Großkontinent auseinanderzubrechen. Aus tiefen Grabenbrüchen ergossen sich gewaltige Massen basaltischer Laven aus dem Erdmantel über große Flächen. In der Mitte des Superkontinents zeichnete sich ein Mittelmeer, der *Tethysozean*, ab, der die Landmasse von Osten her in einen Nordkontinent, *Laurasia* (mit Eurasien und Nordamerika), und in einen Südkontinent, *Gondwania* (mit Afrika, Arabien, Indien, Australien und Antarctica), aufspaltete.

Illies hat die Aufspaltung damit begründet, daß die beiden riesigen Urkontinente das Rotationsgleichgewicht der Erde gestört hätten. Daher hätten sie sich gespalten, und im Ergebnis dieses Prozesses sei nun die Erde mehr oder weniger gleichmäßig mit Einzelkontinenten bestückt.

Die gegenwärtige Rekonstruktion der *Pangaea* mit den einzelnen Kontinenten beruht darauf, daß es Bullard gelungen ist, die morphologisch beste Einpassung der Kontinentalränder mittels Computerrechnungen zu erreichen. Dabei ging er wegen des Einflusses von Wellenbewegungen, Gezeiten und Abspülung nicht von den heutigen Küsten aus, sondern von einer Wassertiefe von rund 900 m am Rand des Kontinentalsöckels bzw. am Kontinentalhang. Das Ergebnis dieser Art von Puzzlespiel ist beeindruckend.

Seit dem Perm, vor allem aber seit der Wende Trias/

Jura vor etwa 195 Millionen Jahren, entwickelten sich aus kontinentalen Gräben langsam Riftzonen, in die das Meerwasser eindrang und die sich zu ozeanischen Schwellen erweiterten. In einer ganzen Reihe aufeinanderfolgender Stadien kam es zum ständigen Zerfall der Landmasse, so daß neue Ozeane wie Atlantik und Indik entstanden. Dabei mögen zwischen den einzelnen Platten zunächst noch gewisse Landverbindungen vorhanden gewesen sein. Sicher ist, daß sich in den letzten rund 200 Millionen Jahren vor der Gegenwart die geographische Verteilung von Kontinenten und Ozeanen und damit auch die Wasserzirkulation in den Meeresbecken erheblich verändert haben.

Zu Beginn der erdgeschichtlichen Neuzeit vor 65 Jahrmillionen war bereits eine Verteilung von Land und Meer vorhanden, die im ganzen dem jetzigen Erdbild entsprach. Die erste Entwicklungsphase des Atlantiks in der Kreidezeit ist etwa mit dem heutigen Roten Meer vergleichbar. Die uneinheitliche Drift der Platten war teilweise mit einer Rotation und links- oder rechtsgerichteten Drehung verknüpft. Darauf deutet der bogenförmige Verlauf des Zentralteils des Atlantischen Rückens hin.

Süd- und Nordatlantik waren zuerst selbständige Gebilde, die sich zeitlich und stärkemäßig unterschiedlich entwickelt und sich dann später vereinigt haben.

Während sich Afrika und Südamerika vor etwa 130 Millionen Jahren zu trennen begannen und der Südatlantik gegen Ende der Kreidezeit vor 125 Millionen Jahren ein Teil des Weltozeans wurde, lösten sich Europa und Nordamerika erst vor rund 80 Jahrmillionen voneinander.

In einem frühen Stadium der Öffnung des Atlantiks wurden in trogartigen Senken im Riftbereich, also in flachen Meeresräumen (wie vor der Küste Marokkos), durch Verdunstung von Meerwasser Salze abgelagert, die etwa 150 bis 180 Millionen Jahre alt sind. Im Verlauf der Entwicklung zum offenen Ozean wurden die Salze mit anderen Sedimenten bis zu 8000 m Tiefe abgesenkt und von mächtigen jüngeren ozeanischen Schichten überlagert. Ähnliche Salzlager wurden auf der anderen Seite des Atlantiks vor Neuschottland erbohrt. Daraus darf man

schließen, daß die Kontinentalränder von Marokko und Kanada einst zusammenhingen.

Auch einförmige Plateaubasalte (Trapp) in Indien, Afrika und im Paranágebiet Südamerikas, deren Förderung vor rund 180 Millionen Jahren einsetzte, weisen auf Dehnungsvorgänge und die beginnende Öffnung des Südatlantiks hin.

Vom Präkambrium bis zur älteren Kreidezeit müssen Südamerika und Afrika unmittelbar zusammengehangen haben. Erst seit der Grenze Unter-/Oberkreide ist auf beiden Kontinenten eine getrennte geologische Entwicklung sichtbar.

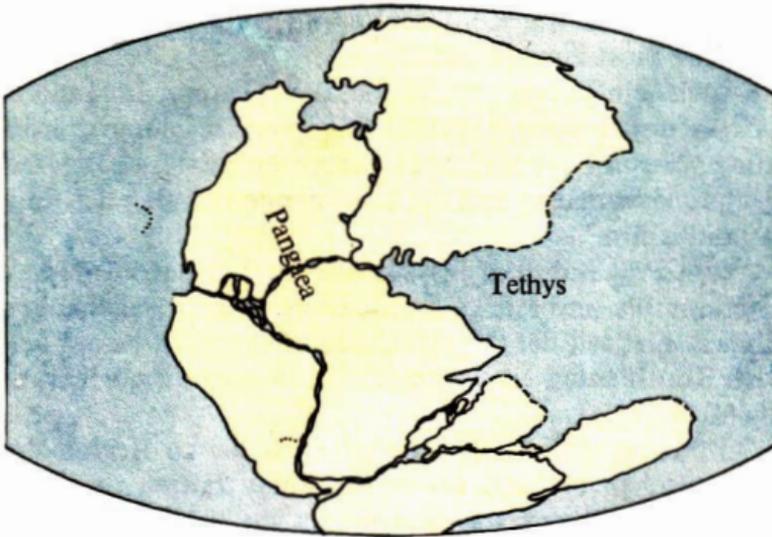
Grönland und Europa waren noch bis zu Beginn der geologischen Neuzeit vor 65 Millionen Jahren vereinigt.

Indien löste sich von Gondwanien vor 80 Millionen Jahren bzw. von Australien über die 90°-Ost-Transformstörung bei einer hohen Meeresbodenspreizungsrate von 16 cm jährlich.

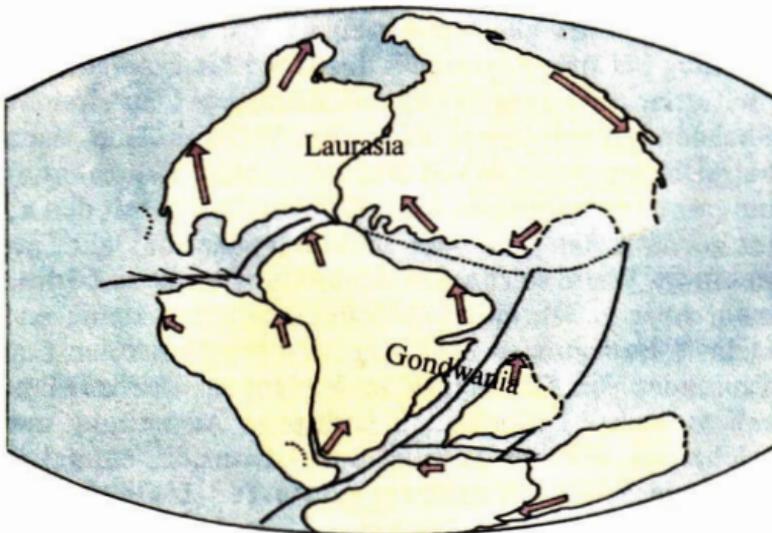
Australien war mit Antarctica als letztem Kontinent noch vereinigt, und beide trennten sich erst vor 45 Millionen Jahren. Etwas früher war bereits Neuseeland abgedriftet.

Vom Atlantik glauben wir zu wissen, daß seine Ausbreitung bis zum Beginn des Tertiärs 5 bis 6 cm jährlich, im Tertiär rund 2 cm betrug und heute nur 1 cm erreicht. Rechnen wir mit einem mittleren Wert von 3 cm, dann hat sich der Atlantik seit Beginn unserer Zeitrechnung um nur 60 m vergrößert. Kein Wunder, daß es mit den alten geodätischen Methoden schwierig oder unmöglich gewesen ist, Werte solcher Größenordnung exakt zu bestimmen. Aber in Jahrmillionen summieren sich kleine und kleinste Bewegungen zu Kilometern, zu Hunderten und Tausenden von Kilometern! Im Verlauf der Driftvorgänge gab es immer Perioden mit geringerer Ausweitung und solche mit erhöhter Zerrung und Expansion, einmal in der Kreidezeit, dann nahe der Kreide-Tertiär-Grenze und zuletzt im Alttertiär.

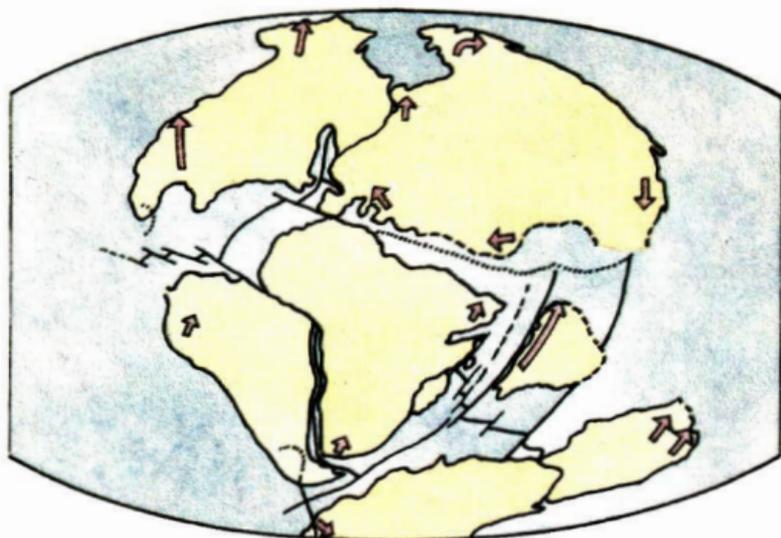
Versuchen wir, uns die Erdgestaltung in sehr ferner Zukunft vorzustellen! Atlantik und Indik werden sich um 1 bis 4 cm jährlich vergrößern, der Pazifik wird langsam schrumpfen. Australien wird sich auf Indonesien zubewe-



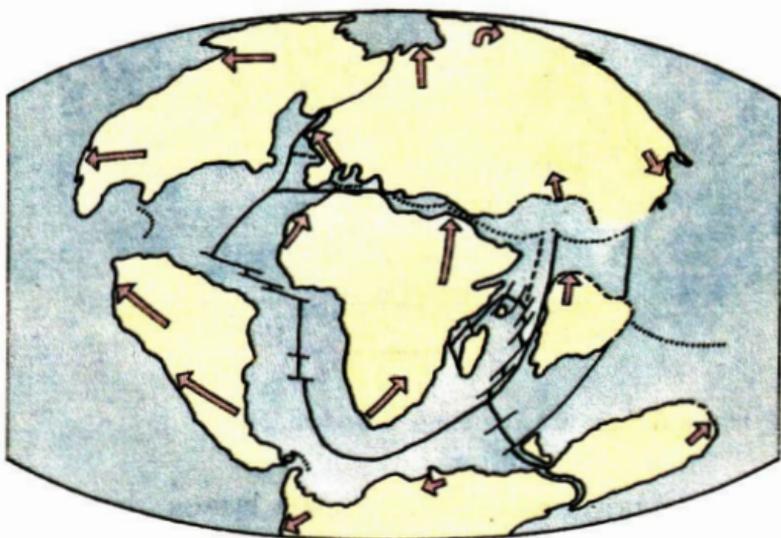
Ursprünglich einheitliche Landmasse (Pangaea) vor 225 Mill. Jahren (Perm); nach Dietz und Holden 1970



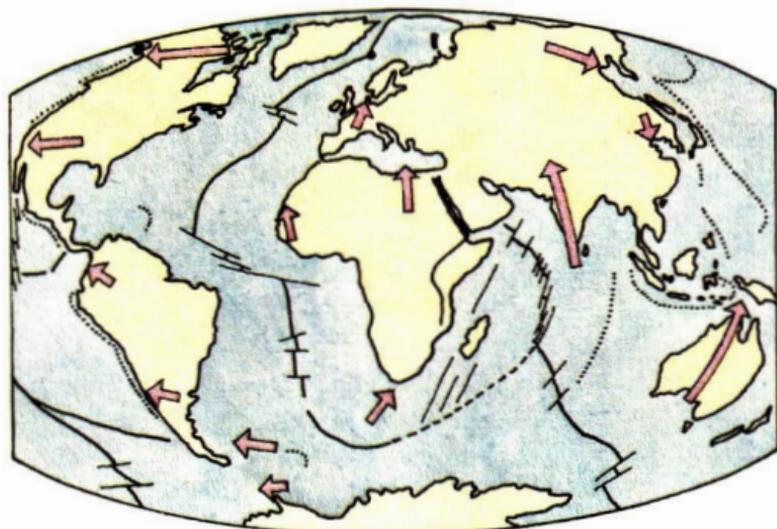
Teile von Pangaea driften auseinander und bilden zwei große Kontinente Laurasia (heutiges Nordamerika, Europa, Asien) und Gondwanaland (heutiges Südamerika, Afrika, Indien, Australien und die Antarktis) vor 180 Mill. Jahren (Trias)



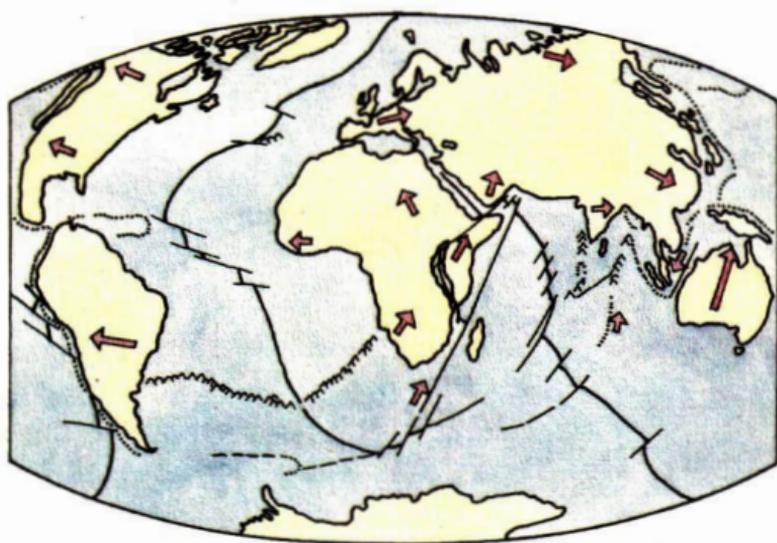
*Beim weiteren Driften entfernen sich Antartica, Indien und Australien immer weiter von der Kernmasse Gondwanien vor 135 Mill. Jahren (Oberer Jura)*



*Südamerika entfernt sich von Afrika, und Afrika driftet nach Norden. Die Entfernung zwischen Afrika und der Antarktis wird immer größer; vor 65 Mill. Jahren (Kreide/Tertiär)*



*Gegenwart*



*Vermutliche Lage der Kontinente in 50 Mill. Jahren*

gen, vermutlich schneller als andere Platten, da es sich (nach Befunden von Irving) in 20 Millionen Jahren fast 5000 km verschoben hat. In Afrika wird sich vielleicht die Somalihalbinsel, das »Horn Afrikas«, abspalten. Das europäische Mittelmeer wird kleiner und kleiner werden.

Nordafrika wird sich auf Griechenland und die Türkei zubewegen.

Und in 150 Millionen Jahren, vielleicht auch erst in 200 oder 300 Millionen Jahren, wird es kaum noch einen Pazifik geben. Nord- und Südamerika haben sich dann mit den Japanischen Inseln, China und Australien zu einem neuen Großkontinent, einer neuen Pangaea, vereinigt, während der Atlantik als größter Ozean die Position des gegenwärtigen Pazifiks einnehmen dürfte. An seinen Rändern werden Subduktionsvorgänge dafür sorgen, daß Meeresboden in die Tiefe gezogen und damit die »Zerstörung« des Ozeans eingeleitet wird.

## Plattenbewegungen in älteren Zeiten der Erdgeschichte?

Über rund 200 Millionen Jahre haben wir die Gestaltung des Erdbilds seit dem Ausgang des Erdaltertums bis in die geologische Gegenwart und nächste Zukunft verfolgen können. Wie aber steht es mit ähnlichen Prozessen im Erdaltertum, in der Erdfrüh- und Erdurzeit? Wenn die ältesten Gesteine, die wir auf der Erde kennen, 3,85 Milliarden Jahre alt sind und die Erde als Planet rund 4,5 Milliarden Jahre besteht, dann erscheinen die 200 Millionen Jahre seit der Trias bis heute als Bruchteil einer langen Erdgeschichte – umfassen sie doch nur ein Zwanzigstel oder, anders ausgedrückt, 5 Prozent der Erdgesamtzeit! Herrschten in den Zeiten vor dem Zerfall der Pangaea ähnliche oder andere Bedingungen, muß man zuvor möglicherweise mit andersartigen Mechanismen der Krustengestaltung rechnen? Paläomagnetische Messungen in alten Gesteinskomplexen und Narbenzonen alter Gebirge mit Resten ozeanischer Lithosphäre weisen auf die Lage ehemaliger Subduktionszonen hin.

Eine große Rolle bei der Analyse alter Plattenbewegungen haben die in Nordeuropa und auf der anderen Seite des Atlantiks in Neufundland und den nördlichen Appalachen vorhandenen Reste des altpaläozoischen Kaledonischen Gebirges gespielt. Dessen Strukturen auf beiden Seiten des heutigen Atlantiks passen gut zueinander und

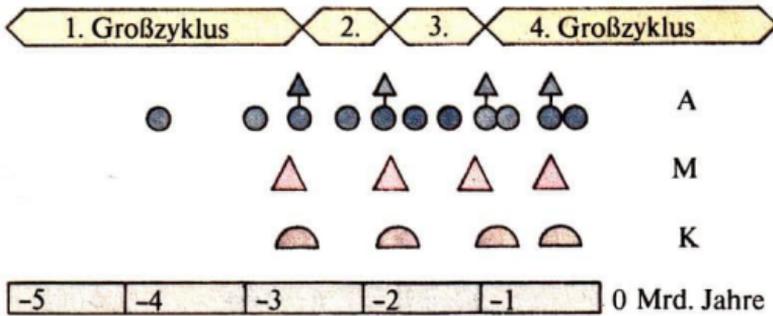
ergänzen sich, am besten dann, wenn man für Grönland eine Rotation von  $14^\circ$  über eine Pol-Lage bei  $58^\circ$  Nord und  $117^\circ$  Ost annimmt (Kvale 1975). So müssen wir vor etwa 600 bis 400 Millionen Jahren mit einem Ozean, einem nicht ganz so breiten Vorläufer des Atlantiks, einem »Protoatlantik«, vielleicht nur von der Größe des heutigen Mittelmeeres rechnen, dem man den Namen Japetus oder Poseidon gegeben hat. Durch Schrumpfung dieses Ozeans und Schließungsvorgänge beim Zusammenprall von Europa/Afrika mit Amerika vor rund 420 bis 370 Jahrmillionen stießen die Platten auf beiden Seiten des paläozoischen Atlantiks aufeinander. Die Gesteinsserien wurden zu den wohl an die 6500 km langen Kaledoniden aufgefaltet, in denen sich vielfach Komplexe ophiolithischer Mantelgesteine finden, wie in Schottland und Skandinavien. Der Äquator lag zu dieser Zeit in Nordamerika und die Sahara nahe dem Südpol. Darauf weisen jüngst entdeckte Gletscherschliffe und andere Vereisungsspuren in Ablagerungen des Ordoviziums hin. Ein entstandener Großkontinent brach an vorgezeichneten Schwächelinien dann langsam auseinander, ein neuer Ozean entstand und erweiterte sich. Die Riftzone entwickelte sich an derselben Stelle wie zuvor, so kam es zu einer andersartigen Verteilung der Landmassen. Schottland, Irland und Norwegen sind an sich Teile von Nordamerika, während Neufundland und das östliche Kanada zu Europa/Afrika gehören. Auf Grund paläomagnetischer Befunde dürfte zumindest das prävariszische Europa aus ursprünglich selbständigen Platten zusammengebaut worden sein (Wiegank 1981). Ähnliche Entwicklungsetappen hat es im Indik gegeben, der sich ebenfalls in alten Zeiten schon einmal geöffnet und wieder geschlossen hat.

Auch die Geschichte des Variszischen Gebirges, das in Mitteleuropa durch seine zahlreich erhaltenen Reststücke besonders interessiert, hat man durch Öffnungs- und Schließungsvorgänge eines alten Riftingozeans zu erklären versucht, da sich einzelne Zonen des Gebirges auf den Britischen Inseln im Osten Kanadas fortsetzen. In der Steinkohlenzeit vor rund 325 Millionen Jahren soll eine Kollision von Nordeuropa und Nordafrika mit Spanien,



*Durch Schottland verläuft eine Transformstörung, die vor rund 350 Millionen Jahren an einer alten Plattengrenze den Nordteil des Landes auseinandergerissen und um rund 100km nach Südwesten bewegt hat. Heute stellt sich die alte Verschiebungszone als der Grabenbruch Great Glen dar, in dem der Loch Ness liegt.*

Frankreich und der Böhmischen Masse, die durch einen breiten Ozean getrennt waren, zur Schließung dieses mitteleuropäischen Meeres und zur Auffaltung des Variszischen Gebirges geführt haben. Das Fehlen größerer Fragmente alter ozeanischer Kruste und die Lagerungsverhältnisse im so kompliziert und differenziert gebauten Mitteleuropa haben aber bislang noch keine befriedigenden Ergebnisse im Sinne einer mobilistischen, plattentektonischen Deutung erbracht, obwohl eine ganze Reihe recht unterschiedlicher Versuche vorliegt. Der im Gegensatz zu anderen Gebieten recht genau geologisch-tektonisch untersuchte mitteleuropäische Raum liefert wenig beweiskräftige Argumente (Olszak und Thierbach 1978). Nicolas meint, die Varisziden seien kein Gebirge wie die Alpen, sondern eher mit den amerikanischen Anden zu vergleichen. Ein solcher Vergleich erscheint indes kaum möglich, weil sich beide Gebirge in ihrem Vulkanismus erheblich unterscheiden. Mitteleuropa ist keine aus ungestörten Einzelplatten bestehende Großplatte wie Afrika oder Australien, sondern besteht aus einem Mosaik größerer und kleinerer Bruchschollen. Daher ergibt sich die Frage, ob der Mechanismus der Plattentektonik, der von globalen Vorgängen abgeleitet wurde, überhaupt auf Pro-

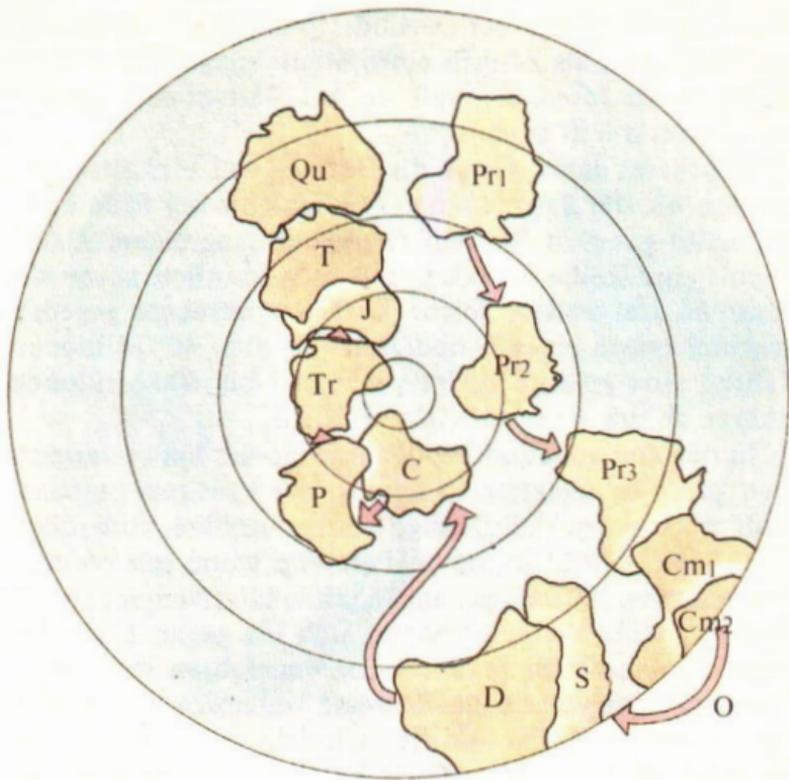


*Plattentektonische Großzyklen mit den Erscheinungen tektonischer und magmatisch-metamorpher Aktivität im Verlauf der Erdgeschichte (nach Olszak 1983). A – tektonische Aktivitäten; M – magmatisch-metamorphe Maxima; K – Einheitskontinente*

bleme anwendbar ist, wie sie beispielsweise im Inneren von Mitteleuropa vorliegen. Andererseits sollte nicht vergessen werden, daß Untersuchungen im kleinen lokalen oder regionalen Rahmen auch dazu führen könnten, den Sinn für globale Prozesse zu verlieren. Mitteleuropa war vor der Alpenfaltung keinesfalls als ein geschlossenes Ganzes vorhanden. Möglicherweise war der langsame Schließungsvorgang eines verhältnismäßig kleinen mitteleuropäischen Ozeans durch mehrere und unterschiedliche Kollisionen von kleinen ozeanischen und kontinentalen Platten – »Mikrokontinenten« – gekennzeichnet. Vielleicht waren die Bewegungen gering und erstreckten sich wenig tief allein auf die obere Lithosphäre.

Nach paläomagnetischen Befunden hat sich das mittlere Europa während der variszischen Epoche im Silur, Devon und Karbon um wenigstens 2000, vielleicht auch um 5000 km verlagert, das hieße mit einer Driftgeschwindigkeit von 1 bis 3 cm jährlich (Brause 1980).

Der Ural, der ebenfalls in der variszischen Ära vor rund 250 Millionen Jahren aufgefaltet wurde, enthält zahlreiche in höhere Krustenteile verfrachtete Bruchstücke alter ozeanischer Lithosphäre. Es scheint, daß der Ural durch die Kollision der europäischen mit der asiatischen Platte entstanden ist und seine Bildung den letzten Akt der Entstehung der Ganzerde Pangaea darstellt, die später dann immer mehr zerfallen ist.



*Die Verschiebung Australiens seit dem Altpräkambrium vor etwa 3 Milliarden Jahren bis in die Gegenwart nach paläomagnetischen Messungen (aus Schmidt-Thomé 1972). Der Wanderweg (gestrichelt) ist auf den heutigen Südpol bezogen. Qu – Quartär; T – Tertiär; J – Jura; Tr – Trias; P – Perm; C – Karbon; D – Devon; S – Silur; O – Ordovizium; Cm<sub>1</sub> und Cm<sub>2</sub> – Kambrium; Pr<sub>1</sub>, Pr<sub>2</sub> und Pr<sub>3</sub> – Alt- bis Jungpräkambrium*

Vermutlich hat es bereits im Präkambrium vor rund 2 bis 2,6 Milliarden Jahren Superkontinente gegeben, deren Entwicklung durch Öffnungs- und Schließungsvorgänge charakterisiert war. Dabei mögen andere Kontinentplatten entstanden sein, als wir sie heute kennen. So hat man für die ältesten Zeiten vor etwa 900 bis 1000, 1750 bis 1900 und rund 2500 bis 2600 Millionen Jahren in Afrika, Kanada und Sibirien mehrfach Plattenbewegungen mit Meeresbodenausweitung und Subduktionsvorgängen sowie Kollisionen beschrieben. Gerade in diesen Milliarden

Jahre alten Gesteinsserien sind Ophiolithkomplexe weit verbreitet und als Zeugen eines Mantelmagmatismus von besonderem Interesse, weil sie mit wertvollen Erzlagernstätten verknüpft sind.

Es scheint daher, als ob die Bildung von Einheitskontinenten wie der Pangaea in der Geschichte der Erde nicht einmalig gewesen ist. Auf Grund umfangreicher Daten meint eine Reihe Autoren, daß es vermutlich zuvor wenigstens drei weitere solche Einheitskontinente gegeben hat und neben einer Periodizität von rund 400 Millionen Jahren eine größere Periode von 600 bis 800 Millionen Jahren zu erkennen sei (Olszak 1983).

In der Zeit vor rund 2600 Jahrmillionen hat es vermutlich keine Großplatten in der Art der heutigen gegeben, weil noch keine zähflüssige Asthenosphäre vorhanden war. Daher dürfte in diesen Perioden kaum mit plattentektonischen Öffnungs- und Schließungsvorgängen zu rechnen sein. Vielmehr haben sich bis gegen Ende des Proterozoikums vor etwa 2 Milliarden Jahren wohl überwiegend gebirgsbildende Prozesse innerhalb der Kontinente abgespielt. Dies dürfte vielleicht mit dem höheren Wärmefluß und andersartigen Konvektionsvorgängen zusammenhängen.

Wahrscheinlich ist, daß sich Atlantik, Indik, Pazifik und andere Ozeane im Laufe der erdgeschichtlichen Entwicklung im Milliardenbereich von Jahren mehrfach geöffnet und wieder geschlossen haben. In einem Zeitraum von 200 bis 250 Millionen Jahren endet der Weg der im Rift eines Grabens und späteren mittelozeanischen Rücken neu gebildeten ozeanischen Lithosphäre durch Subduktion in einem Tiefseegesenke, oder es erfolgt der Anbau an eine kontinentale Platte. Die mittelozeanischen Rücken sind kurzlebige Gebilde, und es scheint, als ob (nach Hess) der gesamte ozeanische Meeresboden alle 300 bis 400 Millionen Jahre durch neues Mantelmaterial ersetzt würde. Die alten Ozeane liegen heute trocken, ihre Sedimente und magmatischen Serien finden sich in den Gebirgen der Kontinente und berichten von der Entwicklung der einzelnen Platten.

## Plattenbewegungen und Gebirgsbildung heute

Eine Karte der gegenwärtigen Platten mit deren Verschiebungsrichtungen lehrt, daß Driftbewegungen noch heute vor sich gehen. So wandert die Eurasiatische Platte nach Südosten (ohne Anatolien und Vorderindien, die nicht dazugehören), wenn es dabei auch für einzelne Teile zu differenzierten Veränderungen kommt.

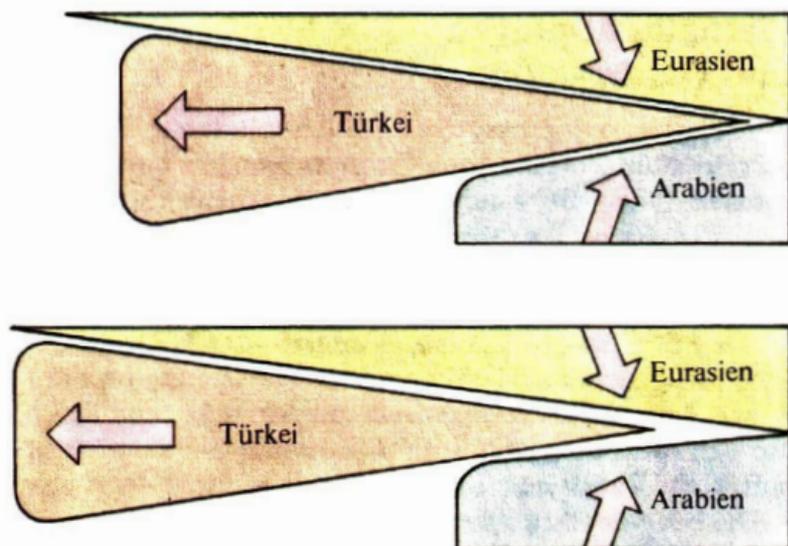
Die »Ernährung« Eurasiens erfolgt vom Mittelatlantischen Rücken einschließlich seiner Fortsetzung im nördlichen Polarmeer, im Gegensatz zur Afrikanischen Platte, die von mehreren Seiten ihren Zuwachs erhält, vom Atlantik und Indik her. Doch ist das Bild nicht ganz klar.

Die bedeutendsten Bewegungen vollziehen sich mit Sicherheit im Süden Europas, wo das Mittelmeer immer kleiner wird. Dabei wird auch die Adria verschwinden, und Italien wird mit Jugoslawien zusammenwachsen. Das hat Folgen für die südöstlichen Gebiete der europäischen Platte, weil sich das Ägäische Meer vergrößern muß.

Wie in der Zentralzone des Urals und in der Induslinie des Himalaja alte ozeanische Kruste mit Ophiolithen zu beobachten ist, so trifft das auch für die alpidischen Gebirge Mazedoniens, Griechenlands, die Ivreazone der Alpen und für Zypern zu. Hier bezeugen die Ophiolithe die Aktivität einer alten Riftzone im Mittelmeer, des bis zu 1000 km breiten Tethysozeans.

Auf dem Meeresboden lagerten sich sedimentäre Schichten ab, die bei der Kollision der beiden Platten zusammengeschoben und gefaltet wurden. Die breite, vielfach unterbrochene Zone von Ophiolithen – von den Schweizer Westalpen über die Dinarischen Gebirge Jugoslawiens nach Albanien und Griechenland – setzt sich nach Osten zu in der Türkei fort.

Nach wie vor schiebt sich die Afrikanische Platte unter die Europäische. Davon zeugen die schweren Erdbeben des letzten Jahrzehnts in Oberitalien (Friaul), Albanien, Montenegro, Mazedonien, in der Türkei und im Iran. Daß auch in jüngerer Zeit bei der Drift zusätzliche Drehbewegungen im afrikanisch-arabischen Raum eine Rolle spielen, lehrt die 4500 Jahre alte Cheopspyramide in



*Plattenbewegung im Raum des Mittelmeeres (nach McKenzie). Zwischen der Eurasischen und Arabischen Platte bewegt sich die kleinere Türkische Platte entlang der nordanatolischen erdbebenreichen Horizontalverschiebung mit etwa 12 cm jährlich (!) nach Westen und schiebt die Ägäische Platte mit Südgriechenland vor sich her, die nach Südwesten driftet.*

Ägypten, die sich gegen den Uhrzeigersinn gedreht hat. Die griechischen Inseln Kreta, Naxos, Samos und die vielen anderen, die Kykladen und Sporaden, bilden einen Inselbogen und damit einen Plattenrand, der von Süden her von einem Teilstück der Afrikanischen Platte in nördlicher Richtung unter Europa geschoben wird. Libyen und Ägypten werden einmal mit Griechenland und der Türkei kollidieren. Subduktionsvorgänge werden dafür sorgen, daß die Ozeanische Platte mit dem Inselbogen unter der Afrikanischen verschwindet und aufgeschmolzen wird.

Mit Hilfe paläomagnetischer Messungen ist es gelungen, die Bewegungen der Europäischen und Afrikanischen Platte vom westlichen Mittelmeer über die Alpen und Südeuropa bis nach Griechenland genauer zu analysieren. Man konnte feststellen, daß die Drift deshalb kompliziert und im einzelnen differenziert abgelaufen ist

und abläuft, weil die Lithosphäre hier aus einer Reihe kleiner oder Mikroplatten (-kontinente) zusammengesetzt ist. Wenn sich Rotes Meer und ostafrikanische Gräben verbreitern und ozeanisch entwickeln, muß sich die nach Nordosten driftende Arabische Platte weiter unter die iranischen Gebirge schieben, ähnlich wie die Platte Vorderindiens unter die Eurasiatische. Wahrscheinlich sind Bewegungen mehrerer unterschiedlich großer Einzelplatten anzunehmen, wie der Türkischen und der Ägäischen. Darauf deuten die komplizierten Strukturen mit Tiefseesedimenten und Ophiolithen an der Grenze von Afrika, Eurasien und Arabien in der nördlichen Türkei und im nördlichen Iran hin. Mit Beginn des Rifting im Roten Meer im Jungtertiär wurde die Arabische Platte unter die Iranische geschoben, und es kam zu einer Kollision der kontinentalen Komplexe. Die mit 12 cm jährlich nach Westen wandernde Türkische Platte mit ihrer markanten Nordgrenze entlang der erdbebenreichen West-Ost verlaufenden Nordanatolischen Hauptverwerfungszone zwischen Eurasien und Arabien, die sich an ihrem nordöstlichen Ende aufspaltet (Dreispaltenstruktur), schiebt die Ägäisplatte vor sich her, die sich selbst nach Südwesten bewegt.

Ob wir die jungen Vorgänge der Plattendrift in Indien, Südostasien, Australien, die geologischen Besonderheiten der auf der Nahtstelle der Indisch-Australischen und Pazifischen Platte gelegenen Südinsel von Neuseeland mit jungen Krustenbewegungen, Erdbeben, Vulkanismus und Geysiren oder geophysikalische Erscheinungen in Amerika und in der Karibik oder in Antarktika ins Blickfeld rücken – immer wieder werden wir vom Bild einer ruhelosen, lebendigen, dynamischen Erde ergriffen und beeindruckt, deren Kontinente sich im Mittel jährlich rund 3 cm weiter verschieben.

## Streit um wissenschaftliche Modelle

Es wird wohl immer so sein, daß eine neue Idee oder Hypothese den Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhebt. Das war seinerzeit bei der Lehre von der Kontraktion so,

das war bei Alfred Wegener nicht anders, und warum sollte die Plattentektonik eine Ausnahme machen? Jede neue Hypothese wird zunächst ein mehr oder weniger schematisches Modell sein, in dem man bei genauerer Überprüfung von Einzelheiten eine Reihe Unklarheiten und Widersprüche findet, vor allem dann, wenn die neuen Vorstellungen zu einem Dogma erhoben und kritiklos auf alles Mögliche angewandt werden. Andererseits sollte man bei Unklarheiten im Detail nicht gleich die Gesamtkonzeption ablehnen oder gar als unwissenschaftlich verdammen. Was bisher von der Mehrzahl der Kritiker an Gegenargumenten zur Plattentektonik vorgebracht wurde, kann das Großbild kaum erschüttern und die Anhänger nicht entmutigen. Jedenfalls ist die Plattentektonik als dynamisches Modell nach unserer Überzeugung und der vieler anderer Geowissenschaftler besser fundiert als ältere Hypothesen. Kann eine Reihe Einzelheiten nicht jedermann befriedigen, führt die Gesamtheit aller Untersuchungen trotz gewisser Bedenken doch zu der neuen Vorstellung. So endet der Schlußbericht eines internationalen Komitees über den oberen Erdmantel, dessen Vorsitzender der sowjetische Geologe V. V. Belousov war. Tiefe Bohrungen auf Kontinenten und dem Ozeanboden werden neue Erkenntnisse liefern, so daß in Kürze manche Unklarheiten beseitigt sein dürften.

Unter den international führenden Gegnern der Hypothese findet sich freilich Belousov mit an erster Stelle. Er meint, daß die Plattentektonik auf einer flüchtigen Verallgemeinerung von Daten beruhe, die man stark überschätze. Sie sei eine »wissenschaftliche Modeerscheinung«, eine viel zu grobe Schematisierung der wirklichen Naturphänomene. Im Gegensatz zu Belousov sind andere sowjetische Geotektoniker wie W. E. Chain und A. Pejve überzeugte Anhänger der neuen Gedanken. Belousov hat eine eigene fixistische Hypothese entwickelt. Wir geben ihm recht, wenn er sagt, daß die im wesentlichen von der Seegeophysik mittels indirekter Methoden erzielten Meßergebnisse und Erkenntnisse am Meeresboden zu schnell verallgemeinert, die von Generationen von Geologen auf den Kontinenten erarbeiteten, durch Beobachtungen und Fakten gesicherten Resultate zu sehr ver-

nachlässigt würden. Besonders fehle es der Neuen Globaltektonik an einem historischen Herangehen an die komplizierte Entwicklung von Kontinenten und Ozeanen. »Fenster« zur Analyse der Geschichte der Erdkruste seien nur die Kontinente mit ihrer über 3 Milliarden Jahre umfassenden Geschichte, während die Entwicklung der Ozeane erst etwa 150 Millionen Jahre umfasse. So könnten Beobachtungen in den Ozeanen nichts Konkretes über die alte Entwicklung der Erdkruste aussagen (1981). Um zu einem neuen, tragfähigen Modell der Erdgestaltung zu gelangen, dürfe man nicht wie jetzt allein vom Ozean aus auf den Kontinent, sondern müsse umgekehrt vor allem vom Kontinent auf den Ozean blicken und zu einer Synthese von ozeanischer und festländischer Geologie kommen. Es sei nicht ohne Vorbehalte möglich, Vorgänge und Beobachtungen in der ozeanischen Sphäre auf die tektonischen Prozesse der Kontinente zu übertragen.

Dazu meint freilich W. E. Chain, daß diese Kritik deshalb nur bedingt anerkannt werden könne, weil die Kontinente doch ein ozeanisches Entwicklungsstadium durchgemacht hätten, oder daß, wie es A. Pejve ausdrückt, »die Kontinente im Meer geboren werden«.

Einige Zeit später hat Belousov betont, daß man mehrere Hypothesen diskutieren müsse und nicht nur ein Modell als richtig und endgültig bezeichnen dürfe. Belousov und einige andere erkennen z. B. die magnetischen Streifenmuster beiderseits der ozeanischen Rücken nicht an und halten sie für eine Illusion. Belousov führt dabei die vermeintlichen Kanäle auf dem Mars an. Die »Streifen« seien nur unregelmäßig verteilte Flecken, die konzentrisch zu den alten präkambrischen Schilden der Kontinente liefen und außerdem in einigen Teilen der ozeanischen Rücken fehlten. Später hat Belousov die Symmetrie der magnetischen Bänder nicht mehr ganz gelehnet, sie aber auf eine Reihe aufeinanderfolgender alter Lavaergüsse zurückgeführt. Genau parallele Streifen darf man aber wegen der ungleichmäßigen Ausbreitung der Ozeanböden und unterschiedlicher Aktivität des Vulkanismus innerhalb der von Transformstörungen unterbrochenen Rücken in Raum und Zeit nicht erwarten.

Belousovs Kritik richtet sich weiter gegen die Sedimente am Ozeanboden, die altersmäßig nicht immer der Vorstellung der Ozeanbodenausweitung entsprächen, gegen den unklaren Mechanismus der Plattenbewegung über Tausende von Kilometern, die Subduktionsvorgänge und mancherlei anderes. Benioffzonen sind für ihn tiefgreifende Störungen, die an die Dichteunterschiede innerhalb des oberen Mantels auf ihren beiden Seiten gebunden seien und deren Einfallen sekundär sei. Subduktion im Sinne der Plattentektonik sei nicht vorhanden, da die dichteren Mantelanteile unter die weniger dichten flössen.

Bekannte Kritiker der Plattentektonik sind Vater und Sohn Meyerhoff in den USA, die in fixistischem Sinne eine konstante Lage der Rotationsachse der Erde, der Kontinente und Ozeane schon seit 1600 Millionen Jahren voraussetzen. Die Salzlager als Sedimente arider Gebiete und die Kohlelager in höheren Breiten wie in Spitzbergen seien Beweise für eine konstante Luft- und Wasserzirkulation. So sei die permokarbonische Eiszeit der Südkontinente mit der Hypothese der Kontinentaldrift nicht erklärbar, weil die Gletscher der Pangaea nicht hätten ernährt werden können. Das Gebiet habe außerhalb der Winde gelegen, die die erforderliche Feuchtigkeit bringen. Kontinente und Ozeane hätten sich im Verlauf der Erdgeschichte nicht verlagert. Die Verschiebung von Klimazonen und der Salzgürtel könnten durch die Bildung bzw. das Untertauchen von Schwellen in den Ozeanen erklärt werden.

Die magnetischen Streifenmuster sind nach der Interpretation der Meyerhoffs, ähnlich wie bei Belousov, alt und nicht jung. Da sie zu den Alten Schilden konzentrisch verlaufen, stünden sie genetisch mit deren Anlage in Zusammenhang.

Jüngst hat jedoch A. Meier (1981) auf der Grundlage paläomagnetisch rekonstruierter Kontinentlagen zeigen können, daß eine eindeutige geographische Lageveränderung der Salzbildungszonen seit dem Devon vor etwa 400 Millionen Jahren bis zum Tertiär mit einer Genauigkeit von rund fünf Breitengraden nachweisbar ist.

Wenn sich die Erde nicht vergrößert, meinen die

Meyerhoffs, könnten sich Nord- und Südamerika bzw. Europa/Afrika nicht fortbewegt haben, da sie Subduktionsprozesse nicht anerkennen. Doch scheinen Tauchfahrten und Beobachtungen am Meeresboden zu bestätigen, daß Subduktionsvorgänge nicht hypothetische Vorstellung, sondern Tatsache sind, wie im Bereich des Mittelamerikanischen Grabens im Seegebiet von Kostarika. Auch jung aufreißende Gräben sind mehrfach am Ozeangrund festgestellt worden. Ein anderer »Antimobilist« aus den USA, A.J. Mantura (1977), spricht von »geophysikalischen Illusionen« der Drift und hält mit Belousov den Mechanismus der Kontinentverschiebung für unklar, falsch und mechanisch unmöglich. Bei der Bewegung einzelner Platten müßten sich andere mitverlagern, um die Erde im Gleichgewicht zu halten. Analysiere man die vermeintlichen Vorgänge, ergäben sich unvereinbare geometrische Widersprüche.

Unter anderen Kritikern der Plattendrift seien noch der englische Geophysiker J. Jeffreys und der Norweger H. Ramberg genannt, der speziell auf die Bedeutung der Schwerkraft bei der Bildung von Faltengebirgen aufmerksam gemacht hat.

Der DDR-Paläontologe H. Kozur (1976) hat betont, daß sich wegen der Mehrdeutigkeit paläontologischer und paläoklimatischer Daten entgegen der heute meist vertretenen Meinung hieraus keine Argumente für oder gegen die Drift finden ließen. Im Gegenteil spreche manches eher für eine weitgehende Konstanz der geographischen Lage der Kontinente. Die Mehrzahl der Rekonstruktionen von Land- und Meerverteilung während der erdgeschichtlichen Perioden beruhe auf falscher Datenauswahl und Fehlern in der zeitlichen Korrelierung der Funde in verschiedenen Gebieten. So seien große Teile des Indiks bereits im Jungpaläozoikum vorhanden gewesen und der Pazifik schon in der Trias ein großer Ozean, der für die Ausbreitung vieler Organismen eine nicht überwindbare Barriere bedeutet habe. Auch der englische Geologe A. Hallam (1981) hat auf einzelne Probleme bei plattentektonischen Rekonstruktionen und der Verteilung von Floren und Faunen hingewiesen. So gebe es Widersprüche zwischen den Erkenntnissen der Bearbeiter fossiler

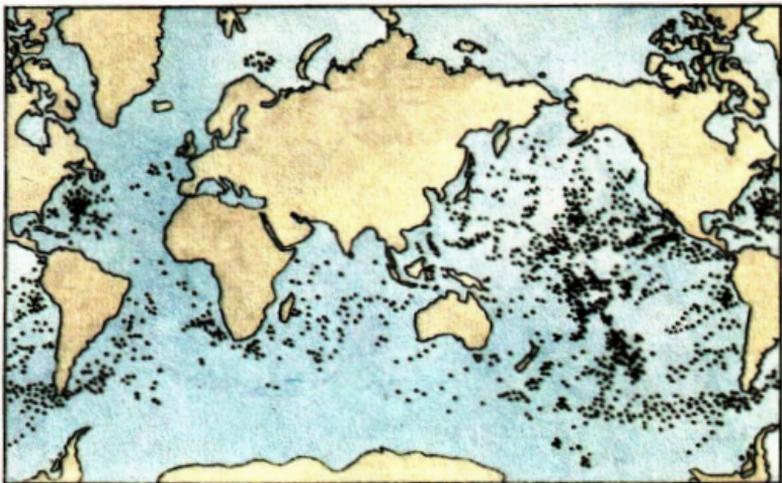
Reptilien und denen der Säugetiere, die aber nach den Auffassungen anderer Paläontologen nur scheinbar sein sollen.

## Vorstoß in Neuland

Bedeutet die Hypothese von der Drift und Ausbreitung des Ozeanbodens ein neues, erweitertes Erdbild? Eröffnet sie vielleicht einen Weg – über die rein theoretische Fragestellung hinaus –, die für die Zukunft der Menschheit wesentliche Frage nach der Entstehung von Bodenschätzen auf den Kontinenten und am Ozeanboden zu lösen? T. Wilson hat ausgeführt, daß die Erde und ihre nutzbaren Lagerstätten Teile eines Systems sind, in dem alle Glieder aufeinander reagieren. Neue Methoden der Erkenntnis eröffnen neue Möglichkeiten, auch den Meeresboden und Teile des Erdinneren zu erforschen.

In den landfernen, tieferen Ebenen der Ozeane in Bereichen sehr geringer Sedimentation und ganz besonders im Pazifik bedecken fleckenhaft mehr oder weniger unterschiedliche *Manganknollen* den Meeresboden. Sie sind verschieden geformt, porös, schalenartig aufgebaut, werden bis zu 25 cm groß und sehen wie schwarze Kartoffeln aus. Mitunter sind es auch zentimeterdicke Krusten am Ozeanboden. Einzelne Regionen zeigen eine Anhäufung bis 50%, und auf 1 km<sup>2</sup> kommen bis zu 25 kg. Andere Stellen sind völlig frei. Außer Mangan und Eisen enthalten die Knollen Kupfer, Nickel und Kobalt. Als Quelle dieser Metallführung werden gegenwärtig die basaltischen Magmen angesehen, die der Beeinflussung von erwärmtem Ozeanwasser unterliegen.

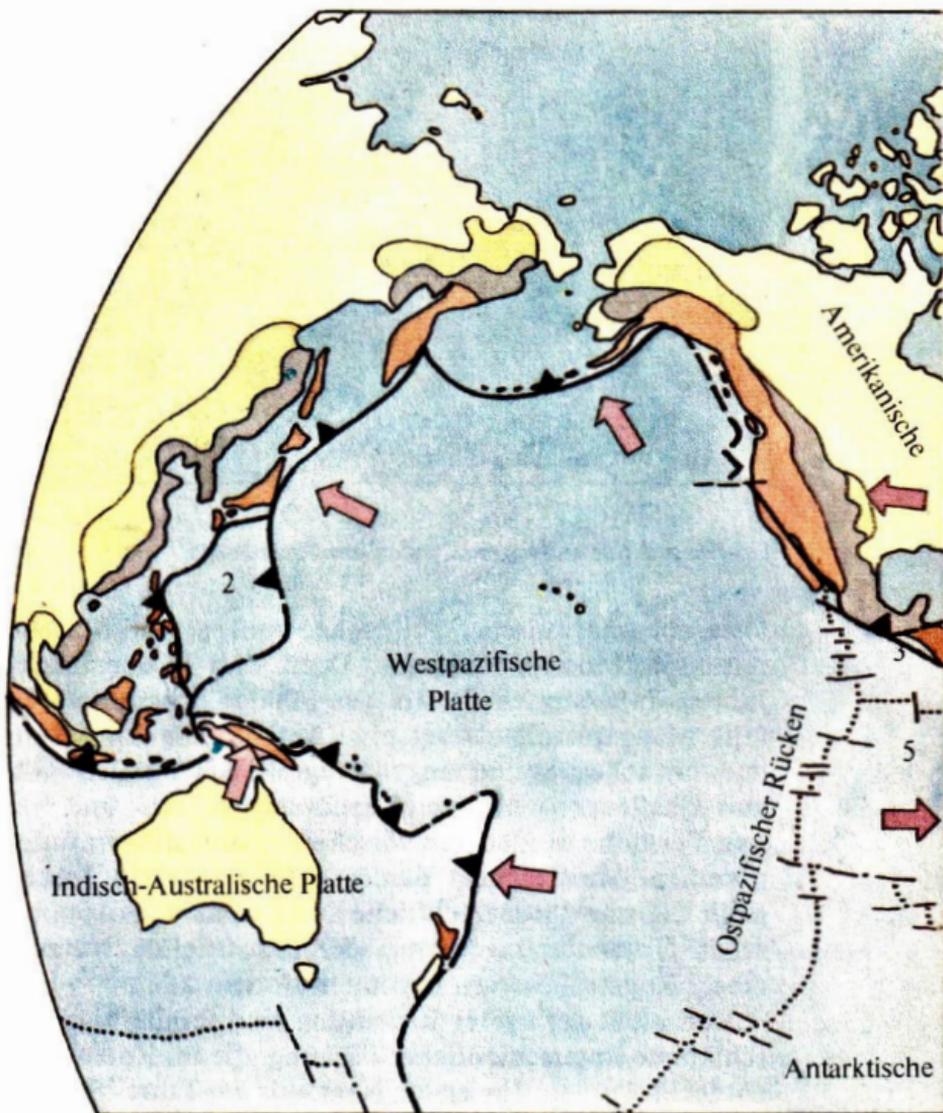
Die Vorräte belaufen sich auf Milliarden Tonnen, im Pazifik möglicherweise auf 100 bis 200 Billionen Tonnen. Die Lagerstätte harzt der Erschließung und bildet eine wichtige Rohstoffreserve, zumal die Vorräte an den genannten Metallen die in den Lagerstätten des Festlandes weit übertreffen. Freilich sind technisch und wirtschaftlich nicht alle Vorkommen nutzbar. Gegenwärtig rechnet man mit rund 350 Milliarden Tonnen abbauwürdiger Mengen. Zur Zeit gibt es bei der Gewinnung noch unge-



*Gebiete mit Eisen-Mangan-Knollen am Ozeanboden*

löste abbautechnische, politische, transport- und aufbereitungstechnische Probleme. Doch sind in den letzten Jahren im zentralen Pazifik aus 5000 m Wassertiefe bereits Manganknollen über eine fortlaufende Eimerkette oder ein schweres und langes Saugrohr des Schiffes »Glo-mar Challenger« erfolgreich gefördert worden, und weitere Versuche werden von verschiedenen Nationen unternommen. Man rechnet damit, daß in wenigen Jahren, nach Klärung der seerechtlichen und technisch-ökonomischen Vorbedingungen, mit der industriellen Nutzung dieser Rohstoffreserven begonnen werden kann.

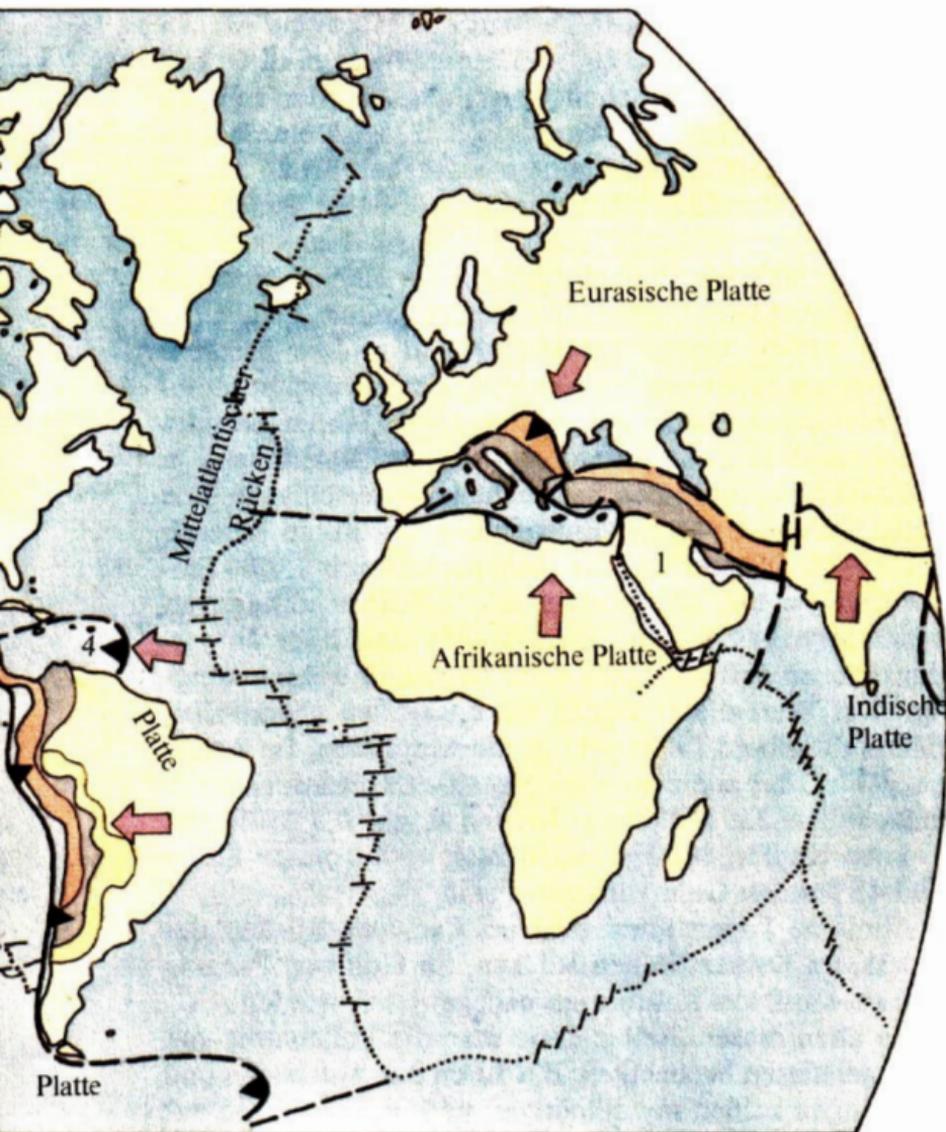
Von nicht geringerer Bedeutung sind feinkörnige Erzschlämme unterschiedlicher Färbung, die im Roten Meer entdeckt wurden. Ihr erster Nachweis im Jahre 1963 war eine Sensation, ein Lehrbeispiel dafür, wie sich in einer aktiven Riftzone aus der Tiefe aufsteigende Schmelzen mit heißen Metallösungen anreichern können. Als Sulfide und Oxide ausgefällt, zeigen sie, daß sich gegenwärtig Erzlagerstätten in Zusammenhang mit der vulkanischen Aktivität in der Zentralzone der ozeanischen Rücken bilden können, wahrscheinlich bevorzugt in frühen Entwicklungsstadien der Öffnungsprozesse der Lithosphäre. An den Flanken des Rückens im Roten Meer findet sich eine Reihe tiefer, kesselartiger Becken.



..... Scheitelgräben der mittelozeanischen Rücken

▲ Subduktionszonen (mit Einfallrichtung)

*Lithosphärenplatten und erdneuzeitliche metallogenetische Provinzen (nach Baumann und Tischendorf 1976). Die Pfeile geben die Richtung der Plattenbewegung an. 1 – Arabische Platte; 2 – Philippinenplatte; 3 – Kokosplatte; 4 – Karibische Platte; 5 – Ostpazifische Platte*



--- Transformstörungen

--- unsicherer Plattenrand

Minerogenetische Zonen, bevorzugt



mit Kupfer



mit Blei



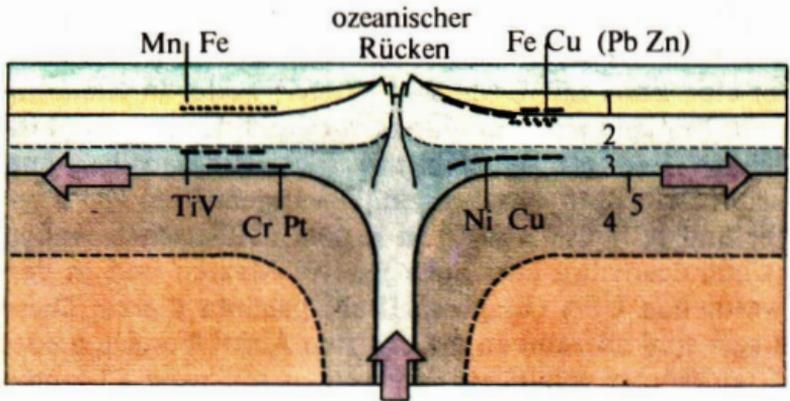
mit Zinn und Wolfram

Besonders das Atlantis-II-Tief auf der Höhe von Mekka in Saudi-Arabien mit 2160 m Tiefe und von rund 90 km<sup>2</sup> Größe ist von zahlreichen Forschungsschiffen genauer untersucht worden. An seinem Boden lagert eine bis zu 62°C heiße Salzlauge mit einem Salzgehalt bis zu 25,7%. Das ist fast das Siebenfache der im normalen Ozeanwasser enthaltenen Menge! Eisen ist darin bis 8000fach, Zink um 400- bis 500fach und Kupfer 100fach angereichert. Außerdem finden sich untergeordnet Blei, Cadmium, Silber, Gold, Quecksilber und andere Metalle. Hier lagern Millionen Tonnen von Schwer- und Buntmetallen, die sich erst in den letzten 13000 Jahren gebildet haben und sich in Raten von einigen Dezimetern je 1000 Jahre weiter in den Sedimenten niederschlagen. Die Salze berichten von der Entwicklung des Roten Meeres, bei dessen Öffnung es eine Ruheperiode von 15000 Jahren gegeben hat, in der unter ariden Klimabedingungen das Meerwasser in einzelnen Becken und Buchten verdunstete, so daß mächtige Salze ausgefällt werden konnten. Der Wert dieser »recht wirkungsvollen chemischen Fabrik« (Seibold 1974) geht in die Milliarden. Im Atlantis-II-Tief, das allein so hohe Metallkonzentrationen enthält, sollen 3,2 Millionen Tonnen Zink, 0,8 Millionen Tonnen Kupfer, 80000 Tonnen Blei, 4500 Tonnen Silber und 45 Tonnen Gold vorhanden sein.

Ähnliche Lagerstätten sind im Carlsberg-Rücken des Indiks, im Ostpazifischen Rücken, im Golf von Panama und im Golf von Kalifornien nachgewiesen worden.

An allen diesen Stellen kann man die Entstehung von Erzlagerstätten beobachten, die durch das Aufsteigen und Eindringen heißer, metallhaltiger, wäßriger Lösungen aus der Tiefe in Spalten und andere Ablösungsflächen der Gesteinskomplexe zustande kommen. Es sind die hydrothermalen Lagerstätten, die sich bei etwa 400°C bilden und einen großen Teil der Erzlagerstätten ausmachen.

Ganz allgemein hat man erkannt, daß überall im Bereich der untermeerischen Rücken zahlreiche Quellen mit um 350°C heißen Lösungen vorhanden sind, die man nicht nur durch Bohrungen und Unterwasserkameras, sondern auch mit bemannten Tauchbooten bis in 3 km Tiefe direkt beobachten konnte. Unter günstigen Umstän-



Schematische Skizze einer ozeanischen Rückenzone mit den wichtigsten Gesteinsformationen und Lagerstättenbildungen im Bereich der ozeanischen Kruste (nach Baumann 1978). 1 – marine Sedimente (Meeresablagerungen), Lage 1; 2 – Basalte, Lage 2; 3 – basische Tiefengesteine (Gabbros), Lage 3; 4 – ultrabasische Tiefengesteine (Peridotite und verwandte Gesteine) der unteren Lithosphäre; 5 – Moho-Diskontinuität. Mn – Mangan; Fe – Eisen; Cu – Kupfer; Zn – Zink; Ti – Titan; Ni – Nickel; Cr – Chrom; Pt – Platin; V – Vanadium

Seite 2: Der Ausgang des Roten Meeres aus 800 km Höhe

den kann es zu unterschiedlicher Ausfällung und einer Zonierung der Lagerstätten in buntmetallreiche Bildungen im Zentrum solcher Becken wie des Atlantis-II-Tiefs und an eisen- und manganreichen Zonen am Rand der Becken kommen. Untersuchungen haben gezeigt, daß für die Herkunft der metallischen Komponente sowohl Auslaugungsprozesse aus der neugebildeten ozeanischen Lithosphäre als auch eine Zufuhr durch hydrothermale Lösungen aus Magmenherden der Tiefe von Bedeutung sein können (Baumann 1978). Auch die Subduktionszonen, in denen sich die abtauchende Platte aufheizt und langsam aufgeschmolzen wird, sind für die Erzbildung sehr wichtig. Hier entstehen unterschiedliche Teilschmelzen in verschiedener Tiefe. Diese können über Spalten und Störungen im Bereich der Konvergenzränder aufsteigen und eine gesetzmäßige Abfolge parallel zu den Tiefseegebirgen gruppierter Lagerstätten von Buntmetallen bilden. Solche Bodenschätze begleiten beispielsweise die Faltengebirge in Ostasien und im Westen Amerikas von Nord

bis Süd, besonders in den südamerikanischen Anden. Sie heißen daher Lagerstätten vom *Andentyp*. In Küstennähe ist eine Zone mit Eisen und Kupfer, weiter in Richtung zum Festland sind ein Gürtel mit Gold, Kupfer und Molybdän und ein Bereich mit Blei, Zink, Silber und schließlich Zinn zu erkennen. Die Lagerstätten von Kupfer und teilweise Molybdän in den chilenischen Anden (Chuquicamata), aber auch jene in Mexiko und in den westlichen USA (Bingham/Utah) gehören hierzu. Diese Lager sind allesamt an die obersten Aufwölbungen großer Granitkörper gebunden und werden seit rund 80 Jahren abgebaut. Sie enthalten Millionen Tonnen Erz. Eine ähnliche Lagerstätte findet sich in der Kasachischen SSR. Zinn- und Wolframlager in Südostasien (Malaysia, Thailand, Indonesien, China) gehören dem gleichen Typ an.

Wirtschaftlich bedeutend sind die Erdöl- und Erdgaslager, deren Auftreten eng mit der tektonischen Entwicklung eines Gebietes verbunden ist. Erwähnt seien die Weltlagerstätten in den etwa 3000 m mächtigen kreide- und jurazeitlichen Sand- und Kalksteinen rund um den Persischen Golf, dem wohl größten Ölfeld der Erde überhaupt. Diese Lager sind an die Randsenken der kleinasiatisch-iranischen Faltengebirge gebunden. Ihre Entstehung beruht auf der Kollision der Arabischen und Eurasiatischen Platte, die zum Schrumpfen eines Ozeans und zur Auffaltung der Gebirgsketten geführt hat.

Viele Lagerstätten setzen sich vom Festland in die überfluteten Randgebiete der Kontinente, den Schelf, fort und werden gegenwärtig schon bis in Wassertiefen von 300 m und darunter ausgebeutet. Rund zwei Drittel der heute bekannten Lagerstätten von Kohlenwasserstoffen liegen in dieser Ozean-Kontinent-Übergangszone. Ständig werden neue Vorräte nachgewiesen, wie z. B. die Lagerstätten in der Nordsee.

Die Suche und Erkundung von Erdöl- und Erdgaslagern geht heute teilweise von plattentektonischen Vorstellungen aus, wenn es auch unter den Erdölgeologen noch manche gibt, die dem Konzept gegenüber skeptisch bleiben. Man glaubt darüber hinaus, daß der erhöhte Wärmetransport in den Inselbögen und im Riftbereich der mittelozeanischen Rücken die Bildung von Erdöl- und

Erdgaslagerstätten ermöglichen könnte. Daher wird zukünftig in manchen Strukturen des ozeanischen Sektors nach günstigen Speichergesteinen gesucht werden, und die Exploration wird über den Schelf hinaus in tieferen Meeresteilen vor sich gehen. Zur Zeit decken allein die Schelfgebiete mehr als 25% der Welterdölförderung.

Bisher hat man über 200 Bohrungen in Wassertiefen zwischen 3000 und 6000 m niedergebracht, da insbesondere einzelne beckenartige Strukturen für die Forschung von erhöhtem Interesse sind. Freilich gibt es dabei nicht nur technische Probleme wie Bohrungen von Schiffen und Plattformen aus oder Transportfragen zu lösen. Wie das Beispiel der Nordsee lehrt, bestehen auch große Gefahren bezüglich der Verschmutzung der Meere.

Die Rekonstruktion alter Plattenbewegungen und der Entwicklung der Weltmeere ermöglicht den Nachweis von Salzablagerungen und Sedimentkomplexen, die für die Speicherung von Erdöl und Erdgas geeignet sind. Nach Ergebnissen französischer Forscher haben sich ergiebige Erdöl- und Erdgasfelder gebildet, als der Atlantik noch jung war und wenig breit, im ganzen vielleicht dem heutigen Persischen Golf ähnelte. Damals muß der Golf von Mexiko ein Meer wie heute der Persische Golf gewesen sein. Als sich der Atlantik im mittleren Mesozoikum zu öffnen begann, hat es eine ganze Reihe Becken gegeben, in denen bei einem Trockenklima eine erhebliche Verdunstung von Meerwasser einsetzte und Salze ausgefällt wurden, so vor der Küste von Gabun und vor dem Kongo in Afrika oder vor Brasilien.

Über zwei Drittel der bis heute bekannten Kohlenwasserstofflagerstätten sind an passive Kontinentalränder gebunden, wie im Atlantik und im Indik. Aber auch Erz- und Diamantenlager lassen sich auf plattentektonischer Grundlage suchen und erkunden, da sich z. B. Vorkommen im westlichen Afrika höchstwahrscheinlich in Brasilien fortsetzen.

Es gibt gegenwärtig manche Möglichkeiten, bisherige Erkenntnisse auf plattentektonischer Grundlage zu überprüfen und mit neuen Fragestellungen an praktische Aufgaben heranzugehen. Die Wissenschaft bringt letztlich nur voran, wer den Vorstoß ins Neuland wagt.

# Erdgeschichtliche Zeittafel

(Formationstabelle)

Gruppe (Ära)	System (Periode) Dauer in Millionen Jahren	Abteilung	Beginn vor Millionen Jahren
Erdneuzeit oder Känozoikum (Neozoikum)	Quartär 2	Holozän (Alluvium)	0,01
		Pleistozän (Diluvium)	1,8 ± 0,5
	Tertiär 63	Jungtertiär (Neogen) Alttertiär (Paläogen)	32... 35 63,5... 66
Erdmittelalter oder Mesozoikum	Kreide 65	Oberkreide	94... 96
		Unterkreide	127... 133
	Jura 74	Malm (Weißer Jura)	142... 153
		Degger (Brauner Jura)	181
		Lias (Schwarzer Jura)	200... 208
	Trias 41	Keuper	229... 237
Muschelkalk		234... 244	
Buntsandstein	230... 250		
Erdaltertum oder Paläozoikum	Perm 45	Zechstein	245... 255
		Rotliegendes	285... 300
	Karbon 70	Oberkarbon	315... 330
Unterkarbon		350... 365	

Gruppe (Ära)	System (Periode) Dauer in Millionen Jahren	Abteilung	Beginn vor Millionen Jahren
	Devon 40	Oberdevon Mitteldevon Unterdevon	370... 380 377... 393 395... 410
	Silur 18		408... 423
	Ordovizium 77		490... 505
	Kambrium 35		520... 540
Erdfrühzeit oder Präkambrium (Kryptozoikum)	Riphäikum 400		etwa 1000 ± 50
	Protero- zoikum 1000		etwa 2000 ± 50
	Archaikum 800		etwa 2800 ± 50
	Kataarchai- kum > 1200		etwa 4000
Erdurzeit	Azoikum		mehr als 4500

*(für Kambrium bis Tertiär nach Odin und Kennedy 1982)*

## Literaturhinweise

- Beloussov, V. V.: Tektonosphäre der Erde, Idee und Wirklichkeit. In: Zeitschr. f. geol. Wiss. Berlin 1974
- Beloussov, V. V.: Geotectonics. Moskau und Berlin-West, Heidelberg, New York 1980
- Beloussov, V. V.: Kontinente und Ozeane – die grundlegende Inhomogenität der Lithosphäre und ihre Untersuchung. Zeitschr. f. angewandte Geologie. Berlin 1981
- Gangnus, A.: Die Erde bebt. Moskau und Leipzig, Jena, Berlin 1980
- Gellert, J. F., (Hrsg.) und Autorenkoll.: Die Erde. Sphären-Zonen-Regionen-Territorien. Leipzig, Jena, Berlin 1982
- Hohl, R. (Hrsg.): Unsere Erde. Eine moderne Geologie. 3., überarbeitete Auflage. Leipzig, Jena, Berlin 1983
- Hohl, R. (Hrsg.): Die Entwicklungsgeschichte der Erde. Mit einem ABC der Geologie. 5., überarbeitete Auflage. Leipzig 1981
- Körper, H.-G.: Alfred Wegener. Leipzig 1980
- Kugler, H., Schwab, M., Billwitz, K.: Allgemeine Geologie, Geomorphologie und Bodengeographie. Gotha, Leipzig 1980
- Lauterbach, R. (Hrsg.): Physik des Planeten Erde. Ergebnisse geophysikalischer Forschungen. Berlin 1975
- Lauterbach, R. (Hrsg.): Physik der Erdkruste. Berlin 1977
- Quaas, M.: Projekt Atlantis. Die Zukunft des Meeres. Leipzig, Jena, Berlin 1982
- Rast, H.: Vulkane und Vulkanismus. 2. Auflage. Leipzig 1983
- Rast, H.: Aus dem Tagebuch der Erde. Leipzig 1974
- Rawitsch, M. G.: Die Rätsel Gondwanas. Moskau und Leipzig 1975
- Reichstein, M.: Die Erde. Planet unter Planeten. Berlin 1979
- Wegener, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 4. Auflage. Braunschweig 1929

»akzent« – die Taschenbuchreihe  
mit vielseitiger Thematik:  
Mensch und Gesellschaft,  
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft  
und Technik. – Lebendiges Wissen  
für jedermann, anregend und aktuell,  
konkret und bildhaft.

---

Die Herausbildung der Neuen Global-  
tektonik oder Plattentektonik kann als  
eine naturwissenschaftliche Revolution  
der Neuzeit angesehen werden. Ihre  
Auswirkungen auf die Geowissenschaften  
sind denen ähnlich, die sich im  
astronomischen Weltbild durch die  
Lehre des Kopernikus ergaben. Mit ihr  
haben z. B. solche markanten Erschei-  
nungen wie »driftende« Kontinente,  
Erdbeben und Vulkane eine Erklärung  
gefunden.

---