

Die K o n t i n e n t a l d r i f t
Von WEGENER zur modernen Plattentektonik.

von Karl BEURLEN, Tübingen

I n h a l t

1. Einleitung
2. Die Idee der Kontinentaldrift und WEGENER
3. Die Kontraktionstheorie
4. Die Kontinente als isolierte Sialtafeln
5. Einwände gegen die Kontraktionstheorie
6. Neue Ansätze aus der Geophysik
7. Das Modell der Plattentektonik
8. Das plattentektonische Modell und die geologische Wirklichkeit
9. Der mesozoisch-känozoische Zerfall der Pangäa
10. Schlußbemerkungen
11. Einige Literatur-Hinweise

1. Einleitung

Seit gut zwei Jahrzehnten werden die Vorstellungen über Gebirgsbildung und Strukturzusammenhänge im Oberflächenbild der Erde durch die Plattentektonik bestimmt. Diese an die Stelle der alten Kontraktionstheorie getretene und ebenso allgemein wie diese anerkannte Theorie gründet auf der aus zahlreichen Befunden erwachsenen Erkenntnis, daß die Kontinente gewissermaßen gewaltige Schollen seien, die, Eisbergen gleich, auf einem säkular beweglichen Untergrund schwimmen und die gesamte Erdkruste in wenige große, durch Nähte voneinander getrennte Platten geteilt sei und daß die Kontinente daher im Lauf der Erdgeschichte ihre Lage verändert haben.

Die Vorstellung, daß die Kontinente nicht festverwurzelt und in ihrer Lage fixiert seien, sondern sich gegeneinander verlagert haben, ist als systematisch durchgedachte Hypothese, vor nahezu 7 Jahrzehnten, lange vor der modernen Plattentektonik, erstmals von ALFRED WEGENER in die Debatte geworfen worden. Er hatte diese Idee in einem kurzen Referat auf der Jahrestagung 1912 der Geologischen Vereinigung vorgelegt und in einem kleinen, 1915 erschienenen Büchlein "Die Entstehung der Kontinente und Ozeane" ausführlicher begründet. Die Hypothese wurde damals von der Fachwelt als Phantasterei abgetan. Jahrzehntelang fristete sie als nicht ganz ernst genommene Spekulation ihr Dasein am Rande der geologischen Forschung. Vor etwas mehr als zwei Jahrzehnten ist die Vorstellung von der Wanderung der Kontinente, zunächst ganz unabhängig von WEGENER, neu konzipiert worden. Sie hat in einem Siegeszug von wenigen Jahren die geologische Vorstellungswelt von Grund auf umgestaltet. Der als Phantast mehr oder weniger vergessene Außenseiter WEGENER rückte damit fast über Nacht in die Rolle eines Bahnbrechers der modernen Geologie.

Im Jahre 1980 jährte sich zum hundertsten Male der Geburtstag des 1880 als Sproß eines märkischen Pastorengeschlechtes in Berlin geborenen ALFRED WEGENER. Nach einer erfolgreichen Hochschullaufbahn kam er bei einer von ihm organisierten Grönland-Expedition auf tragische Weise im grönländischen Inlandseis im Jahre 1930, also erst fünfzigjährig, ums Leben. Der Todestag jährte sich 1980 also zum fünfzigsten Mal. Anlässlich dieser Gedenkdaten wurde des Begründers der Kontinentaldrift-Hypothese, die durch die Plattentektonik eine späte Anerkennung gefunden hat, auf

einer in seiner Geburtsstadt Berlin zu seiner postumen Ehrung abgehaltenen internationalen Tagung gedacht. In einem im selben Jahre erschienenen Buch schilderte M. SCHWARZBACH das Leben Alfred WEGENER's und gab eine Würdigung seines wissenschaftlichen Lebenswerkes. In vielen Zeitschriften, ja sogar in der Tagespresse wurde WEGENER als der Bahnbrecher des modernen geologischen Weltbildes gedacht.

Wir wollen versuchen, soweit das auf wenigen Seiten möglich ist, den Weg zu verfolgen, der von der ersten Konzeption der Idee einer Verschiebung der Kontinente bei WEGENER zu dem heutigen, plattentektonischen Konzept der Kontinental-Verschiebung führt, den Weg, auf dem aus dem einstigen Phantasten WEGENER ein Bahnbrecher des modernen geologischen Denkens geworden ist. Das ist aufschlußreich nicht nur für ein vertieftes Verständnis des heutigen geologischen Vorstellungsbildes, sondern darüber hinaus auch für die Art und Weise, wie in der wissenschaftlichen Entwicklung neue Ideen und Hypothesen entstehen und sich schließlich gegen die gewohnten Denkbahnen durchsetzen.

2. Die Idee der Kontinentaldrift bei WEGENER

Der Blick auf einen Globus oder eine Weltkarte zeigt, daß der Atlantische Ozean mit ungefähr gleichbleibender Breite und mit eigenartigem sigmoidalem Schwung sich von dem arktischen Nordpolarmeer bis zur Antarktis erstreckt. Seine von den beiden Amerikas gebildete West- und die von Europa-Afrika gebildete Ostküste verlaufen mit dem gleichen sigmoidalen Schwung auffällig parallel. Der Atlantische Ozean zeigt dadurch ein von den anderen großen Ozeanen in bezeichnender Weise abweichendes Verhalten. Das ist schon A. v. HUMBOLDT aufgefallen, der sich Gedanken darüber gemacht hat. In einem in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts erschienenen Buch von A. SNIDER findet sich, durch eine Zeichnung illustriert, die Vorstellung, daß die beiden Amerikas ursprünglich mit Europa-Afrika zusammengehangen, sich erst später davon getrennt haben und gegen Westen abgedriftet seien. Zu Beginn unsres Jahrhunderts haben einige Naturforscher in Nord-Amerika (PICKERING, TAYLOR, BAKER) eine ähnliche Idee ausgesprochen. Sie waren, wie auch A. SNIDER, darauf durch die eigenartige Küstenparallelität des relativ schmalen, lang gestreckten Ozeanes gekommen, haben diese ihre Idee aber nicht weiterverfolgt und sie auch nicht durch die Untersuchung

geologischer Zusammenhänge zu begründen und zu beweisen gesucht. Sie sind auch selber später nicht mehr darauf zurückgekommen.

Als WEGENER im Jahre 1912 in dem erwähnten Vortrag vor der Geologischen Vereinigung seine Hypothese über die Verschiebung erstmals entwickelte, waren ihm diese seine Vorläufer ebenso wenig bekannt wie der geologischen Fachwelt. Bei diesen waren es mehr oder weniger einfache Gedankenblitze geblieben, die nicht in der Auseinandersetzung mit den geologischen Befunden zu Hypothesen weiterentwickelt wurden. Auch WEGENER ist zu seiner Vorstellung einer Kontinentaldrift durch die bemerkenswerte Parallelität der atlantischen Ost- und Westküste angeregt worden. Als kausal denkendem Naturforscher wollte es ihm nicht eingehen, daß die Besonderheit des lang gestreckten Atlantischen Ozeans nur eine zufällige Bildung sei. Die Vorstellung, daß die Kontinente beiderseits dieses Ozeanschlauches ursprünglich zusammengehangen haben und später auseinandergedriftet seien, erschien ihm die einfachste und plausibelste Erklärung. Anders aber als seine Vorgänger begnügte der Forscher WEGENER sich nicht damit eine solche Erklärungsmöglichkeit auszusprechen und für den Atlantik ein Sonderverhalten zu unterstellen. Wenn die beiden Amerikas sich tatsächlich westwärts verlagert haben, so muß man mit der Möglichkeit von Kontinentalverschiebungen ganz allgemein rechnen. Das was im Atlantik sich so besonders deutlich zeige, müsse auch in anderen Bereichen der Erdkruste vermutet werden. So meinte er, es müsse ursprünglich ein einheitlicher Groß-Kontinent existiert haben, eine Pangaea. Dieser sei zerfallen und seine Bruchstücke, unsre heutigen Kontinente, seien auseinandergedriftet und dadurch seien die sie heute trennenden Ozeane entstanden. Der Ausgangszustand sei also eine pazifische Ozean- und eine Pangaea-Kontinental-Hemisphäre gewesen. Mit dieser von WEGENER gezogenen Konsequenz ist die Vorstellung über die Entstehung des Atlaniks von vornherein in einen geotektonisch umfassenderen Rahmen hineingestellt worden. Der Ansatz WEGENER's ist daher schon von Anfang an, ganz anders als bei seinen Vorgängern, als konsequent durchgedachte geotektonische Hypothese entwickelt. Mit gutem Recht wird daher WEGENER und werden nicht diese Vorläufer als Begründer der Kontinental-Verschiebungshypothese herausgestellt.

Auch damit begnügte WEGENER als gewissenhafter Forscher sich nicht. Vielmehr versuchte er gleich, diese seine Vorstellung an den geologischen Be-

funden zu prüfen. Hinsichtlich seiner Annahme einer Pangaea konnte WEGENER auf die Feststellung von E. SUESS zurückgreifen, daß nach Ausweis einer einheitlichen und gemeinsamen, jung-paläozoischen Flora, der sog. *Glossopteris*-Flora, die heute durch Ozeane voneinander getrennten Süd-Kontinente Süd-Amerika, Afrika, Australien, zu denen auch Indien, trotz seiner Lage nördlich des Äquators noch gerechnet werden muß, zum mindesten bis zum Ende des Paläozoikums einen zusammenhängenden Groß-Kontinent gebildet haben müssen; denn in all diesen Kontinenten ist die *Glossopteris*-Flora mit den gleichen Arten vorhanden, was einen Floren-Austausch durch diesen ganzen Raum anzeigt. SUESS nannte diesen Kontinent den Gondwana-Kontinent. SUESS hatte sich freilich vorgestellt, daß die heutigen Restkontinente von Gondwana an der gleichen Stelle lagen, wie heute. Die heute trennenden Ozeane, Süd-Atlantik und Indik, seien eingebrochene Teile des alten Groß-Kontinentes. Hier setzte nun WEGENER ein. Die Entfernungen von Süd-Amerika über Afrika nach Indien und Australien seien so groß, daß man sich nicht vorstellen könne, daß die Arten sich über diese Entfernungen ausgebreitet haben, ohne daß artliche Differenzierungen auftreten. Zum anderen aber, und das schien ihm noch beweiskräftiger, führte WEGENER aus: Die Paläogeographie des Paläozoikums, in der die heutigen Kontinente (Nord-Amerika, Eurasien) in der heutigen Ausdehnung, abgesehen von randlichen Flachmeer-Überflutungen, vorhanden waren, gibt nirgends einen Raum, in dem die gewaltigen Wassermassen, die heute Süd-Atlantik und Indik erfüllen, untergebracht werden können. Es gibt nur einen Weg, diese Wassermassen unterzubringen, nämlich die Restkontinente von Gondwana zusammenzuschieben und den Pazifik entsprechend zu vergrößern. Da zwischen Süd-Amerika und Afrika auch in der heutigen Lebewelt bemerkenswerte zoogeographische Beziehungen festzustellen sind, meinte WEGENER, daß der Zerfall und das Auseinanderdriften der alten Pangaea nicht schon am Ende des Paläozoikums eingesetzt habe, sondern ein erdgeschichtlich relativ junger Vorgang sei.

Der Gondwana-Kontinent war im Jung-Paläozoikum nicht nur durch seine einheitliche *Glossopteris*-Flora gekennzeichnet, sondern trug auch ausgedehnte Inlands-Vereisungen. In Süd-Amerika sind die Moränenbildungen dieser Gondwana-Eiszeit von Argentinien bis in tropische Breiten Mittelbrasiliens flächenhaft verbreitet. In Afrika reichen Moränen-

Ablagerungen vom Kapgebirge im Süden bis in das äquatoriale Kongobecken. Dort hat man eine Eisströmung von Nord-Namibia gegen Süden, zum Kapgebirge hin festgestellt, d.h. also vom Äquator weg gegen den Südpol. In Australien finden sich die Moränenbildungen auf dem ganzen Kontinent, der also offenbar von einer geschlossenen Inlandseis-Decke verhüllt war. In Indien finden sich die gleichaltrigen Moränen-Bildungen auch nördlich des Äquators und sie lassen sich nach Norden bis in den Himalaya verfolgen. Bei der heutigen Lage der Gondwana-Teilkontinente ist eine solche Inlands-Vereisung, die von antarktischen bis über äquatoriale Breiten sich ausdehnt, in der Tat kaum vorstellbar. Man hat gelegentlich einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit gesucht durch die Annahme, daß die Vereisung z.T. von hoch aufragenden Gebirgen ausgegangen sei. Der Ausweg hat sich als nicht gangbar erwiesen, da fast in allen Vorkommen, Moränen-Ablagerungen mit marinen Ablagerungen verzahnt sind. Man hat seine Aushilfe in der Annahme von Verlagerungen der Rotationsachse, d.h. des Nord- und Südpoles des Erdkörpers gesucht, so etwa in der SIMROTH'schen Pendulationstheorie. Aber abgesehen davon, daß Verschiebungen in der äußeren Erdkruste eher vorstellbar sind als Verlagerungen der Rotationsachse des Globus, konnte WEGENER zeigen, daß es keine Pollage gibt, wo nicht ein Teil der Gondwana-Eisdecke bei der heutigen Lage der Gondwana-Restkontinente in äquatoriale Breiten fällt. Die Gondwana-Vereisung ist nur mit der Annahme der Kontinentaldrift, welche die Gondwana-Restkontinente näher zusammendrückt, verständlich und möglich.

Es waren recht gewichtige und, so möchte man meinen, doch auch recht überzeugende Gesichtspunkte, die WEGENER zu Gunsten seiner Vorstellung ins Feld führen konnte. Trotzdem stieß er auf eine fast einhellige Ablehnung. Biogeographische Befunde -- sie spielten bei WEGENER eine ziemlich große Rolle -- könnten, so warf man ein, für so weittragende Theorien wie die Kontinental-Verschiebung überhaupt nicht herangezogen werden. Die Konstruktion von Brückenkontinenten, wie das ja auch SUESS schon gemacht habe, könne festländischen Floren- und Faunen-Austausch genau so gut erklären wie die Verschiebungs-Hypothese. Diese Ansicht hat vor allem H. v. IHERING konsequent und mit Leidenschaft verfochten.

Ausgehend von den Überlegungen über die Gondwana-Eiszeit hat dann WEGENER zusammen mit seinem Schwiegervater, dem Meteorologen KÖPPEN, systematisch die Klima-Zeugnisse in den Formationen aller erdgeschichtlichen Perioden

vom Kambrium an gesammelt und für jede Erdperiode die Klima-Befunde in eine Weltkarte eingetragen und darauf aufbauend für jede Erdperiode eine Klima-Karte gezeichnet, in der die zu vermutenden Pollagen, die Äquatorialzone usf. rekonstruiert wurden. Es zeigte sich, daß die paläoklimatischen Zeugnisse, die unter der Voraussetzung der heutigen Lage der Kontinente oft widersprüchlich und kaum verständlich sind, sich zwanglos zusammenfügen, wenn man Lageveränderungen der Kontinente zugrundelegt. Auch diese Befunde, die im größeren Zusammenhang durchaus überzeugend erscheinen, wollte man nicht anerkennen. Es war vor allem der Botaniker KERNER-MARILAUN, der nachzuweisen versuchte, daß nicht nur die aus den überlieferten Klimazeugnissen gezogenen Schlüsse über das Vorzeitklima nicht unbedingt stichhaltig seien, sondern daß auch die sicher nachweisbaren Abweichungen in der Ausdehnung der Klimagürtel von der heutigen Situation verstanden werden können unter der Voraussetzung, daß die Lage der Kontinente während der Erdgeschichte konstant geblieben sei. Wechselnde Ausdehnung der Meeresräume, stärkeres oder schwächeres Oberflächenrelief auf den Kontinenten übten einen so großen Einfluß auf die jeweilige Klima-Entwicklung, daß alle anscheinenden Unstimmigkeiten dadurch erklärt werden könnten.

Es war in der damaligen Fachwelt E. DACQUE wohl der einzige, der schon 1915 eine etwas positivere Stellung zu den Ideen von WEGENER bezog.

3. Die Kontraktionstheorie

Bei dieser einhelligen Ablehnung, auf die WEGENER mit seiner Vorstellung stieß, trotz der doch recht überzeugenden Gesichtspunkte, dürfte wohl unbewußt eine gewisse Rolle gespielt haben, daß WEGENER ein Außenseiter war -- er war ja Meteorologe und Grönlandforscher und hatte sich, als er seine Hypothese vorlegte, zuvor nie mit geologischen Problemen befaßt also gewissermaßen ein geologischer Laie, der nun das ganze geologische Vorstellungsgebäude und seine theoretischen Voraussetzungen in Frage stellte. Dazu kam, daß WEGENER seiner Vorstellung von der Kontinentaldrift keine zureichende und befriedigende Ursachenbegründung geben konnte. Zwar hatte er zunächst auf die Polfluchtkraft und die Gezeitenreibung als die Kontinentaldrift verursachenden Kräfte hingewiesen. Daß der darin liegende Antrieb aber für weitreichende Kontinentalwanderungen nicht aus-

reicht, hat auch WEGENER selbst anerkannt und hat damit zunächst auf eine ursächliche Begründung verzichtet. Damit stand er in einem grundsätzlichen Nachteil gegenüber dem herrschenden geologischen Vorstellungsbild, das eine Kontinental-Verschiebung grundsätzlich ausschloß, das aber für seine Vorstellungen eine schlüssige theoretische Ursachen-Begründung geben konnte.

Man muß sich in die damalige Zeit und in das damals herrschende geologische Vorstellungsbild zurückversetzen, um diese einhellige Ablehnung der WEGENER'schen Idee zu verstehen, aber auch um die Kühnheit zu verstehen, mit der WEGENER dieses herrschende Vorstellungsbild anzuzweifeln und ihm ein anderes entgegenzustellen wagte, dem er keine zureichende Ursachen-Erklärung geben konnte. Das war wohl weitgehend gerade dadurch möglich, daß WEGENER eben ein geologischer Außenseiter war.

Das Vorstellungsbild, in dem die Geologie dieser Zeit lebte, war an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert von E. SUESS in dem klassischen Werk "Das Antlitz der Erde" in einer umfassenden Synthese überzeugend und klar gestaltet worden. Es hatte sich danach in der geologischen Spezialforschung durchaus bewährt. Sämtliche Beobachtungsbefunde fügten sich zwanglos und widerspruchsfrei ein. Die theoretischen Grundlagen waren eindeutig und erschienen theoretisch gut begründet und vermittelten eine befriedigende Ursachen-Erklärung. Es gab keinen Grund, diese Voraussetzungen anzuzweifeln, da Beobachtung und Erfahrung und theoretische Voraussetzung sich logisch ergänzten und zusammenfügten. So war es fast zwangsläufig, daß man auf diesem Wege fortschritt und den dieses Vorstellungsbild in Frage stellenden Vorstoß nicht annahm. Die Denkbahnen waren klar vorgezeichnet.

Der Ausgangspunkt dieses geologischen Vorstellungsbildes war die KANT-LAPLACE'sche Hypothese über die Entstehung des Planetensystems. Demnach war die Erde aus einem Gasball durch Abkühlung zu einem glutflüssigen Globus geworden. Infolge stetiger Wärme-Abgabe an den Weltraum hat sich an dessen Oberfläche eine verfestigte, abgekühlte Kruste gebildet, ebenso wie ein Hochofen-Glutfluß sich mit einer Schlackenkruste umkleidet. Die im Zug der Abkühlung und Krustenbildung sich vollziehende Entgasung führte zur Bildung der aus den leichtesten flüchtigen Komponenten gebildeten Atmosphäre, aus der sich im Zug der Abkühlung das flüssige Wasser niederschlug, die Hydrosphäre bildend. Bei der Krustenbildung mußte als Folge der Gravita-

tion eine Stoffsonderung, eine Differentiation erfolgen, derart daß außen die leichteren Komponenten, die auch einen niedrigeren Schmelzpunkt haben und daher zuerst sich verfestigen, abgeschieden wurden und darunter nach der Tiefe zu die schwereren Komponenten sich konzentrierten, die auch einen etwas höheren Schmelzpunkt haben, sich also etwas verzögert verfestigten. So entstand eine Außenkruste oder Außenschale von im Mittel granitischer Zusammensetzung, in der die aluminium-silikatischen Mineralien vorherrschen. Sie hat SUESS als die sialische Außenschale bezeichnet, ein Begriff der später durch den heute üblichen Begriff des Sial ersetzt worden ist. Darunter liegt die im Mittel eine basaltische Zusammensetzung zeigende, aus eisen-silikatischen Mineralien zusammengesetzte Unterkruste, die SUESS als die Sima-Schale bezeichnet hat. Die sialische Außenkruste kennen wir aus unseren Kontinenten, die simatische Unterkruste aus dem aus tiefliegenden Herden gespeisten Vulkanismus.

Mit der zunehmenden Wärme-Abgabe an den Weltraum, d.h. mit der fortschreitenden Abkühlung muß nicht nur die Unterkruste nach innen hinein langsam wachsen, sondern es muß der glutflüssige Kern einen Volumenverlust durch Abkühlung erleiden, d.h. sich kontrahieren. Die schon erstarrte Kruste kann darauf nur so reagieren, daß sie sich zusammenfaltet oder einbricht, so wie die Haut eines schrumpfenden Apfels sich faltet und verrunzelt. So entstanden die Kontinente als die Partien, die schon verfaltet sind, durch die Faltung dicker geworden sind und daher höher aufragen, während in den Ozeanen noch die nicht verfalteten Partien vorhanden sind.

Mit guten Gründen konnte man somit einen durch die Schwere-Differenzierung bei der fortschreitenden Abkühlung bewirkten Schalen-Aufbau unterstellen mit einer äußeren gasförmigen atmosphärischen Schale, einer die feste Gesteinskruste bedeckenden hydrosphärischen Schale, die in den aufragenden Kontinenten unterbrochen ist, mit einer leichteren sialischen Außen- und schwereren simatischen Innenschale. Diese Vorstellung und ihre Begründung durch die stetige Wärme-Abgabe an den Weltraum, und die weitere durchaus folgende Konsequenz der Kontraktion durch stetige Abkühlung und der durch Faltung entstehenden Kontinente waren durchaus schlüssig und die Beobachtungsbefunde schienen sie eindeutig zu bestätigen. In diesem Rahmen

aber konnten zwar die Kontinente durch immer weiter um sich greifende Verfaltung der Kruste wachsen, es konnten auch über dem sich kontrahierenden Erdinnern größere Kontinent-Teile ein- und niederbrechen und dadurch unter den Meeresspiegel geraten, so wie das im Gondwana-Kontinent offenbar der Fall war, aber nicht konnten Kontinente ihre Lage verändern; denn sie waren ja doch Teile einer ringsum geschlossenen Schale.

Im Rahmen dieses schlüssigen und eindeutig begründeten Vorstellungsbildes war für die Vorstellungen WEGENER's kein Platz, ja gab es im Grunde gar keine Diskussionsmöglichkeit.

4. Die Kontinente als isolierte Sial-Tafeln

Nur ein Außenseiter, dem die theoretischen Grundlagen des geologischen Vorstellungsbildes etwas ferner standen als dem, der mit ihnen und in ihnen von Anfang an in die Geologie hineingewachsen ist, der daher auch die so auffälligen Züge im Oberflächenbild der Erde, in der Konfiguration der Kontinente und Ozeane ganz unvoreingenommen in sich aufnahm, der unbeschwert von theoretischen Voraussetzungen die biogeographischen und paläoklimatischen Daten in einen Zusammenhang zu bringen suchte, konnte die den theoretischen Grundlagen der Geologie seiner Zeit so ganz widersprechende Idee einer Kontinentaldrift konzipieren. Wollte er aber dieses Konzept nicht nur als eine geistreiche These, als eine vage Möglichkeit stehen lassen, wie das seine Vorläufer getan hatten, so mußte er sich den theoretischen Grundvoraussetzungen der allgemein anerkannten Geologie stellen, mußte sich mit den seiner These widersprechenden Vorstellungen auseinandersetzen.

Die Befunde, die WEGENER zu seiner Drift-Vorstellung geführt hatten, die Konfiguration des Atlantik, die bio- und paläogeographischen, sowie die paläoklimatischen Zusammenhänge, schienen ihm so überzeugend und unwiderlegbar, daß er allen von Geologen ihm entgegengehaltenen Einwänden zum Trotz an seiner Vorstellung festhielt. Im Prinzip war er damit vor die Frage gestellt, wie eine Verlagerung der Kontinente gegeneinander möglich sei, wenn diese, wie die Vorstellung voraussetzte, die gefalteten Abschnitte einer ringsum durchgehenden, geschlossenen Sial-Außenkruste seien. WEGENER beantwortete diese Frage mit der Hilfs-Hypothese und Gegenannahme, daß es eben keine durchgehend geschlossene Sial-Schale gebe,

sondern die Kontinente große isolierte Sialschollen oder Sialtafeln seien, die, Eisbergen gleich, in die Sima-Unterlage tief eingetaucht, schwimmen. Ob der Grönlandforscher WEGENER durch seine Beobachtungen an Eisbergen, zu dieser Vorstellung angeregt war, bleibe dahingestellt.

Diese Vorstellung war zur Zeit WEGENER's nicht eindeutig beweisbar. Sie war zunächst eben eine Hilfhypothese, die notwendig war, um die Vorstellung einer Kontinental-Verschiebung theoretisch überhaupt erst möglich zu machen. Immerhin konnte sich WEGENER auf die Erfahrungen über das Schwerefeld auf der Erdoberfläche berufen.

Aus der Alltagserfahrung wußte man schon lange, daß überall auf der Erde, auf den Ozeanen, auf den Kontinenten und selbst in hohen Gebirgen die gleiche Schwere herrschte. Darauf gründet ja die Möglichkeit überall die gleichen Gewichte zu verwenden. Genauere Messungen, die im vergangenen Jahrhundert schon durchgeführt wurden, haben zwar gezeigt, daß geringe Schwankungen der Schwere in verschiedenen Orten vorkommen. Aber dabei handelt es sich immer nur um geringe Abweichungen von einem normalen Mittelwert. Theoretisch sollte man ja erwarten, daß die Schwere in einem aufragenden Gebirge, wo die mächtige Gesteinsfolge, die das Gebirge aufbaut, vorhanden ist, größer ist als die Schwere auf einem Ozean, wo die Gesteinsfolge des Gebirges fehlt, dazu auch noch unterhalb des Meeresspiegels anstelle einer 4000 - 5000 m mächtigen Gesteinsfolge des Kontinentalsockels eine ebenso mächtige, aber viel leichtere Wassermasse vorhanden ist. Die exakten Messungen haben diese theoretische Erwartung nicht bestätigt; die geringen, gemessenen Abweichungen vom mittleren Schwerewert sind um vieles geringer als die rechnerisch zu erwartenden zwischen Gebirgen und Ozeanen. Zudem zeigte sich örtlich z.T. sogar ein gegenteiliges Verhalten, nämlich ein Schwere-Defizit im Gebirge und ein Schwere-Überschuß auf dem Ozean.

Unter den verschiedenen Erklärungsversuchen für dieses Schwere-Verhalten hat sich WEGENER für die Hypothese von AIRY entschieden, wonach das leichtere Sial-Material der Oberkruste verschieden dick sei und verschieden weit in die Tiefe reiche. Diese Vorstellung hat er dahingehend abgewandelt, daß er annahm, daß eben nur in den Kontinenten eine Sial-Decke vorhanden sei, die verschieden tief, je nach ihrer Mächtigkeit, in die Sima-Unterlage eintauche, daß aber in den Ozeanböden eine eigentliche Sial-Decke fehle, die Sima-Unterlage also bis nahe an den Meeresboden heranreiche.

Dadurch wird in den Ozeanen das Fehlen der sialischen kontinentalen Gesteine kompensiert. Die Kontinente wären demnach isolierte Sial-Tafeln, die im Sima-Untergrund eingetaucht schwimmen. Damit gewann WEGENER die theoretische Voraussetzung für die Möglichkeit horizontaler Verlagerungen der Kontinente.

Freilich tauschte er dafür eine andere theoretische Schwierigkeit ein. Weshalb ist die Sial-Außenschale nicht, wie man doch auf Grund der Abkühlungs-Differentiation annehmen müßte, eine den ganzen Erdkörper umschließende, zusammenhängende Schale? Weshalb ist sie nur in einzelnen, getrennten Tafeln ausgebildet? Dieses Problem ist dem petrographischen Überlegungen ferner stehenden Meteorologen WEGENER nicht bewußt geworden, mußte aber für die Geologen jener Jahre der Übernahme dieser Hypothese hemmend im Wege stehen. Die seither in der Geophysik gewonnenen Erkenntnisse haben die Hypothese WEGENER's bestätigt, aber das Problem, das damit aufgeworfen wird, besteht auch heute noch. Es ist zwar seither mehrfach diskutiert worden, aber eine befriedigende Antwort ist bis heute nicht gefunden.

5. Einwände gegen die Kontraktionstheorie

Mit der These von den Kontinenten als isolierten Sial-Tafeln hatte WEGENER die Idee der Kontinentaldrift auch theoretisch unterbaut. Mit ihr war aber gleichzeitig auch ein grundsätzlicher Einwand gegen die herrschende Kontraktionstheorie ausgesprochen. Trotz allem blieb die Fachwelt bei ihrer ablehnenden Haltung. Da zureichende Ursachen für so weitreichende Verlagerungen von isolierten sialischen Kontinentaltafeln nicht angegeben werden konnten, erschien die überkommene Kontraktionstheorie mit ihrem logisch schlüssigen Gedankengebäude der beobachteten Wirklichkeit in befriedigenderer Weise gerecht zu werden.

Aber irgendwie hat der von WEGENER gegebene Anstoß doch zu einer kritischen Beunruhigung geführt. Die Diskussion wollte nicht mehr verstummen. Das zeigt sich schon daran, daß außer dem 1924 erschienenen Buch von KÖPPEN & WEGENER über die Klimate der Vorzeit das 1915 erstmals erschienene Büchlein über die "Entstehung der Kontinente und Ozeane" bis zum Jahre 1929 4 Auflagen erlebte und in dieser Zeit seinen Umfang um mehr als das Doppelte erweiterte. Auch nach dem Tode WEGENER's (1930) ist es

noch mehrere Male nachgedruckt worden.

Der südafrikanische Geologe AL. du TOIT, der sich in Süd-Afrika eingehend mit den Problemen der Gondwana-Eiszeit befaßte und in einem Süd-Amerika-Aufenthalt auch die afrikanischen mit den entsprechenden süd-amerikanischen Formationsfolgen vergleichen konnte, hat sich auf Grund seiner Beobachtungen leidenschaftlich für die Ideen WEGENER's eingesetzt. Aber auch er erreichte keinen Durchbruch zur endgültigen Anerkennung.

Wichtiger wurde es, daß in der gleichen Zeit, in den Jahren zwischen den beiden Weltkriegen, auch unabhängig von WEGENER sich kritische Stimmen gegen die herrschende Kontraktionstheorie erhoben. Man hatte die radio-aktiven Elemente entdeckt. Im radio-aktiven Zerfall erkannte man eine im Erdinnern vorhandene Wärme-Quelle, durch die die Wärme-Abgabe des Erdkörpers an den Weltraum kompensiert wurde. Damit war der auf der Abkühlung des Erdkörpers gründenden Kontraktionstheorie die Grundlage entzogen.

Dazu kamen dann noch geomechanische Überlegungen. Die über einem schrumpfenden Erdinnern in der inhomogenen und vergleichsweise dünnen Erdkruste entstehende Gewölbespannung könnte nicht über Tausende von Kilometern fortgepflanzt werden, um zu einem extremen Zusammenschub nur in ganz schmalen mobilen Gürteln zu führen. Vielmehr müßte so wie das ja auch in der Haut des schrumpfenden Apfels der Fall ist -- die Erdkruste überall gleichmäßig kleinstückig zerbrechen und verrunzeln. Es war vor allem diese geomechanische Überlegung, welche den englischen Geologen HOLMES, sowie auch JOLY veranlaßt hat, nach neuen Wegen zu suchen, um die Gebirgsbildung zu erklären. Dabei näherten sie sich in gewisser Hinsicht WEGENER'schen Gedankengängen, indem sie annahmen, daß Strömungsbewegungen im subkrustalen Raume Zusammenschiebungen in der Erdkruste bewirken könnten und daraus dann die Gebirgsbildung erklärt werden könnte. Daß die radio-aktive Wärme-Entwicklung im Erdinnern dabei eine Rolle spielen könnte, wurde dabei auch schon erwogen.

Einwände gegen die Kontraktionstheorie kamen vor allem auch aus der Alpen-Geologie. R. STAUB, ein schweizerischer Alpengeologe, führte die Bildung der großen, mediterranen -- variszischen und alpidischen -- Gebirgsgürtel auf ein wechselweise erfolgendes Auseinander- und Gegeneinander-Driften eines Eurasia-Nord- und eines Gondwana-Süd-Kontinentes zurück. Dadurch sei

der mediterrane Raum wechselweise geosynklynal ausgeweitet und orogen zusammengeschoben worden. Als Ursache hatte STAUB ähnlich wie ursprünglich auch WEGENER an die Polfluchtkraft gedacht. Auch ARGAND, ein anderer Schweizerischer Alpengeologe, hat durch subkrustale Strömungen ausgelöste Verschiebungen in der Erdkruste für die Gebirgsbildung verantwortlich gemacht.

Ganz ähnliche Gedankengänge verfolgten auch die österreichischen Alpengeologen O. AMPFERER und R. SCHWINNER. Der enge Zusammenschub in übereinander gestapelten Deckenpaketen in dem nur schmalen alpinen Gürtel könne, so meinten sie, mechanisch nur verstanden werden als eine Folge von subkrustalen Strömungen. In der Weiterführung der Gedankengänge von O. AMPFERER hat dann der Münchner Alpengeologe E. KRAUS seine Verschluckungshypothese entwickelt. Er nahm subkrustale Kreisströme mit ab- und aufsteigendem Ast an. Durch den absteigenden Strömungsast wurde Material in die Tiefe gesaugt und weggeführt, der darüber liegende Krustenstreifen wurde daher entwurzelt und die dadurch entstehenden Krustenschollen deckenförmig übereinander geschoben. Die eigentliche Gebirgsbildung vollzog sich also durch Verschluckung in die Tiefe und erst danach wurde, infolge isostatischer Ausgleichshebung, der zusammengeschobene und daher viel dicker gewordene Krustenstreifen herausgehoben und damit auch zum Gebirge im morphologischen Sinn.

Die Jahre zwischen den beiden Weltkriegen kennzeichnen sich in der Geologie durch eine zunehmende Kritik an der überkommenen Kontraktionstheorie, die immer deutlicher als unbefriedigend empfunden wurde, da sie den sich mehrenden Kenntnissen eben doch nicht ganz gerecht werden konnte. Diese Situation eines tastenden Suchens nach neuen Wegen zur Erklärung der Vorgänge bei der Gebirgsbildung, die schon aus den wenigen zitierten Beispielen deutlich wird ihnen könnten noch weitere Beispiele zugefügt werden --, bewirkte zwar eine gewisse Auflockerung des Denkens, kamen aber doch nicht zum Durchbruch. Das alles spielte sich doch mehr am Rande der geologischen Forschung ab. Die gut durchdachten Gedankengänge von SCHWINNER oder von E. KRAUS wurden von der Fachwelt kaum zur Kenntnis genommen. Das überkommene Denkgebäude der Kontraktionstheorie blieb trotz der sich mehrenden Einwände das Vorstellungsbild, an dem man sich orientierte. H. STILLE hatte es noch einmal in einer umfassenden Synthese einprägsam zusammengefaßt und hat es danach

noch in regional-geologischen Darstellungen der Entwicklung des europäischen und nord-amerikanischen Kontinentes illustrierend verifiziert. Diese Ausführungen über das Wachstum dieser Kontinente durch Anbau immer neuer Gebirgsgürtel wirken z.T. noch bis heute nach. Aus ihnen wuchs eine weit über Mittel-Europa hinaus wirkende Autorität STILLE's und ein Einfluß dank dessen die Resonanz der Einwände gegen die Kontraktionstheorie doch relativ gering blieb. In USA übte Ch. SCHUCHERT einen ähnlichen Einfluß aus, sowie neben ihm W.H. BUCHER.

Wer eine Stellung gegen die Kontraktionstheorie und zu Gunsten von Gedankengängen, die sich dem WEGENER'schen Vorstellungsbild näherten, bezog, der blieb in diesen Jahren doch mehr oder weniger isoliert. Das blieb zunächst auch noch so in den ersten Jahren nach dem zweiten Weltkrieg. Es ist immer schwer, aus eingefahrenen Denkbahnen herauszukommen, überkommene und gewohnte Vorstellungsbilder aufzugeben. Auch in der Biologie bedurfte es jahrzehntelanger, z.T. sehr heftiger Diskussionen, bis die Vorstellung einer Evolution der organismischen Natur sich endgültig durchsetzen konnte.

6. Neue Ansätze aus der Geophysik

Fast schlagartig änderte sich dieses Bild Ende der fünfziger und zu Beginn der sechziger Jahre, als das neue umfassende, geotektonische Konzept der Plattentektonik erschien, das die WEGENER'sche Idee von der Verschiebung der Kontinente und der jungen Entstehung der Ozeane neu begründete und in wenigen Jahren sich durchsetzte. Kaum einmal in der Geschichte der Wissenschaft hat sich ein so durchgreifender Umbruch im Denkgebäude einer Wissenschaft so rasch vollzogen, wie hier bei dem Übergang vom Konzept der Kontraktionstheorie zu dem Konzept der Plattentektonik und der Kontinentaldrift.

Freilich, so unvorbereitet, gewissermaßen aus dem blauen Himmel, wie es dem flüchtigen Blick erscheinen mag, kam dieser Umbruch auch hier nicht. Er hat seine doch relativ weit zurückreichende Vorgeschichte. Auf der einen Seite hatten die sich mehrenden kritischen Einwände gegen die Kontraktionstheorie in den Jahren seit dem ersten Weltkrieg das Feld doch in etwas aufgelockert und eine gewisse Aufnahmebereitschaft geschaffen. Zum anderen hat die seit dem ersten Weltkrieg sich rasch entwickelnde

Geophysik entscheidende neue Erkenntnisse über den Bau des Erdkörpers geliefert.

Die Erdbebenkunde stand zur Zeit WEGENER's noch in ihren ersten Anfängen. Seit dem Ende des ersten Weltkrieges hat sie sich rasch entwickelt. Es wurden immer leistungsfähigere und immer feiner registrierende Seismometer konstruiert, die es ermöglichten auch die sehr schwachen Bodenerschütterungen von sehr fernen Beben noch aufzunehmen. Gleichzeitig entstanden auch immer neue, gut ausgestattete und fortlaufend registrierende Erdbebenstationen, so daß ein immer vollständigeres, alle Kontinente überdeckendes Netz von Beobachtungsstationen verfügbar wurde, in dem ein internationaler Austausch stattfand. Von einem und demselben Erdbeben verfügte man über die Seismogramme zahlreicher Erdbebenstationen in verschiedener Entfernung vom Erdbebenherd. Durch die vergleichende Analyse dieser Seismogramme konnte man die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Erdbebenwellen und ihrer Wege an der Erdoberfläche und durch das Erdinnere errechnen. Man konnte die Laufzeitkurven und die durchlaufenen Wege rekonstruieren. Es war vor allem der Erdbebenforscher GUTENBERG, der die mathematischen und physikalischen Grundlagen für eine solche vergleichende Analyse der Seismogramme entwickelte.

Man erkannte, daß nicht nur eine Gesteinskruste über einem glutflüssigen Erdinneren liegt, sondern daß der Erdkörper als Ganzes einen Schalenaufbau zeigt, daß zwischen der äußeren Gesteinskruste und dem eigentlichen Erdkern noch die Schale eines Erdmantels vorhanden war. Man erkannte vor allem, daß in der Grenzregion zwischen den Schalen die physikalischen Bedingungen sich sprunghaft ändern, daß hier also Unstetigkeitsflächen trennend vorhanden sind, in denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich sprunghaft ändert, so daß an ihnen die Erdbebenwellen teils reflektiert, teils gebeugt werden. Wichtig für unseren Zusammenhang ist, daß man dabei eine Sprung- und Unstetigkeitsfläche entdeckte, die überall erkennbar, nahe der Erdoberfläche liegt. Man hat sie nach dem Belgrader Mathematiker MOHOROVIĆIC, der erstmals auf sie aufmerksam machte, als die Mohorovičić-Fläche, oder abgekürzt als die Moho-Fläche, bezeichnet. Diese Moho-Fläche, die man mit guten Gründen als die Grenzfläche zwischen der Sial-Außen- und der Sima-Innenkruste deutete, liegt in den Kontinenten in einer mittleren Tiefe zwischen 40 und 50 km, kann in den Hochgebirgen bis zu einer Tiefe

von 70 - 90 km absinken, liegt aber in den Ozeanen ganz flach mit einer Tiefe zwischen 5 - 8 km.

Dieses Verhalten der Moho-Diskontinuitätsfläche bestätigte WEGENER's Hypothese, daß die Kontinente getrennte Sial-Tafeln seien und bestätigte, daß WEGENER recht hatte, als er die AIRY'sche Vorstellung über das Gravitations-Verhalten in diesem Sinne auslegte. Damit war die theoretische Möglichkeit einer Kontinental-Verschiebung bewiesen. Für diese Vorstellung konnte nun auch die Vulkanologie herangezogen werden, die auf Grund petrographisch-chemischer Differenzen eine pazifischen und einen atlantischen Vulkanismus unterschied. Die Geophysiker waren daher zu einer Zeit, da in der Geologie die WEGENER'sche Vorstellung noch ganz abgelehnt wurde, viel positiver in dieser Richtung eingestellt.

Daß aber über die theoretische Möglichkeit einer Kontinentaldrift hinaus eine solche tatsächlich auch stattgefunden hat, das ist endgültig durch den Paläomagnetismus bewiesen worden. Dieser ist eine ganz junge, erst Ende der fünfziger und Beginn der sechziger Jahre entstandene Forschungsrichtung innerhalb der Geophysik. Der Erdkörper ist ja gewissermaßen ein großer Magnet mit einem magnetischen Nord- und Südpol, die den Rotationspolen der Erde sehr nahe liegen. Es gibt also ein magnetisches, auf diese Pole hin orientiertes Erdfeld, auf das Gesteine, welche magnetisierbare Stoffe (wichtig ist vor allem das Eisen) enthalten, eingestellt sind. Relativ eisenreiche Gesteine sind die basischen Kristallingesteine, unter denen die Basalte besonders allgemein verbreitet sind. Nun hat man beobachtet, daß die magnetische Orientierung von Basalten aus früheren erdgeschichtlichen Perioden von der Orientierung des heutigen magnetischen Erdfeldes abweicht. Bei der Nachprüfung dieser Beobachtung an Basalten verschiedenen geologischen Alters stellte man fest, daß das von ihnen angezeigte magnetische Erdfeld in den verschiedenen erdgeschichtlichen Perioden immer wieder ein anderes ist.

Wie ist das möglich? Wenn basaltische Lava an die Erdoberfläche aufdringt, so wird sie zwangsläufig entsprechend dem magnetischen Erdfeld magnetisiert. An der Erdoberfläche kühlt die Lava langsam zum festen Basaltgestein ab. Wenn dabei eine bestimmte Temperatur die sog. Curie-Temperatur, die zwischen 400° und 500° liegt, unterschritten wird, so wird die der heißen Lava induzierte magnetische Orientierung fixiert und bleibt daher erhalten. Das ist

der sog. remanente Magnetismus eines Gesteins. Dieser zeigt also die Orientierung des magnetischen Erdfeldes an, die zu der Zeit der Abkühlung d.h. der Bildung des betreffenden Gesteines geherrscht hat. Wenn der remanente Magnetismus verschieden alter Basalte eines Gebietes in jeder Erdperiode eine andere Orientierung erkennen läßt, so könnte das bedeuten, daß entweder während der Erdgeschichte das magnetische Erdfeld seine Lage verändert hat, was bei einer konstanten Rotationsachse wenig wahrscheinlich ist, oder aber, daß der betreffende Kontinent, auf dem die Messungen durchgeführt wurden, sich gegenüber dem magnetischen Erdfeld verlagert hat. Die Entscheidung zu Gunsten der zweiten, wahrscheinlicheren Deutung ergab sich daraus, daß der remanente Magnetismus gleichaltriger Gesteine von verschiedenen Kontinenten ein verschiedenes Erdfeld, d.h. verschiedene Lage der magnetischen Pole anzeigt. Da aber zu einer bestimmten Zeit nur ein magnetisches Erdfeld vorhanden sein kann, müssen die Kontinente ihre Lage untereinander und zum Erdfeld geändert haben.

Damit hatte man einen ganz konkreten und unmittelbaren Beweis für recht weitreichende Verlagerungen der Kontinentaltafeln auf der Erdoberfläche. Man hat die paläomagnetischen Ergebnisse zunächst auch anzweifeln wollen und hat auf die unvermeidlichen Fehlerquellen der nicht ganz einfachen Messungen hingewiesen. Es sind aber seit Beginn der paläomagnetischen Forschung so zahlreiche Messungen durchgeführt worden, die nicht nur die alten Messungen bestätigten, sondern deren in anderen Gebieten gewonnenen Befunde sich den in den ursprünglichen Messungen abgeleiteten Bewegungstendenzen bestätigend einfügten, daß mögliche Zweifel an den Befunden ausgeräumt sind.

7. Das Modell der Plattentektonik

Mit den neuen geophysikalischen Erkenntnissen sind somit, nahezu fünf Jahrzehnte nach WEGENER dessen Vorstellungen einer Kontinentaldrift bestätigt worden. Zwar waren die von WEGENER ins Feld geführten erdschichtlich-paläogeographischen, paläobiogeographischen und paläoklimatischen Gesichtspunkte durch ihr gutes Zusammenstimmen nicht minder beweiskräftig als die paläomagnetischen Daten. Daß man von diesen aber sich so viel stärker beeindrucken und beeinflussen ließ, so daß man nunmehr die Kontinentaldrift-Idee annahm, das mag z.T. wohl damit zusammenhängen, daß

dem modernen, naturwissenschaftlichen Denken physikalische Begründungen einen höheren, "exakten" Stellenwert haben als jeder andere Gesichtspunkt. Entscheidender aber war wohl, daß zur Zeit WEGENER's die eine fixierte Lage der Kontinente verlangende Kontraktionstheorie noch ein fest gefügtes, schwer zu bezweifelndes Denkgebäude war, während in dem seither verflossenen halben Jahrhundert wohl begründete Einwände gegen sie und neu entwickelte Vorstellungen über subkrustale Strömungen das gesamte Denken fortschreitend mehr aufgelockert haben. Es war eine gewisse Aufnahmebereitschaft für neue Konzepte entstanden.

Nicht zu letzt aber war die Situation dadurch eine völlig andere geworden, daß ungefähr gleichzeitig mit dem Auftreten der neuen paläomagnetischen Forschungsrichtung auch eine neue und befriedigende Antwort auf die Frage nach den Ursachen der Kontinentaldrift angeboten wurde. Der seinerzeitige Hinweis auf die Polfluchtkraft und die Gezeitenreibung war ja, wie auch WEGENER selbst anerkannt hatte, unzureichend. Der Mangel, daß keine zureichenden Ursachenfaktoren für eine Kontinentaldrift aufgezeigt werden konnten und der einer Annahme dieser Idee im Wege stehen mußte, wurde nunmehr behoben.

Die neu gebotene und nun auch befriedigende Antwort auf die Frage nach den Ursachen, welche die Anerkennung der paläomagnetischen Befunde und damit auch der Kontinentaldrift-Vorstellung begünstigte und beschleunigte, kam wiederum von einer ganz anderen und unerwarteten Seite, von der Ozeanographie. Dabei mußte noch ganz besonders beeindrucken, daß die Ergebnisse aus ganz verschiedenen, unabhängigen Forschungsrichtungen, mit ihren Ergebnissen zusammenstimmend, in die gleiche Richtung wiesen.

Die Ozeanographie ist eine sehr junge Wissenschaft. Die Geologie hatte sich entwickelt als eine Geologie der Festländer. Die Ozeane lagen ganz am Rande der geologischen Forschung. Obschon sie rund zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken, hat man sich mit ihnen, deren Gesteinsgrund ja auch nicht unmittelbar zugänglich war, kaum befaßt. In der geologischen Theorienbildung spielten sie keine Rolle. Sie waren terra incognita. Die früheren ozeanographischen Expeditionen, wie etwa die englische Challenger-Expedition, die deutsche Valdivia-Expedition u.a., hatten vorwiegend biologische Zielsetzung. Es ging um die Erforschung der ozeanischen Lebewelt. Nur hin und wieder machte man mit der zeitraubenden

Methode des Senklotes auch eine Tiefenbestimmung und leitete aus diesem weiten Netz von Tiefenbestimmungen die Vorstellung einer Relieffarmut des Ozeanbodens ab. Auch die dem Ozeanboden entnommenen Dredge-Proben waren sehr weiträumig verteilt.

Die Ozeanographie im engeren und eigentlichen Sinn hatte ihre Geburtsstunde in der deutschen Meteor-Expedition der Jahre 1925 - 1927, in den süd-atlantischen Ozean. Erstmals wurde das neu entwickelte Echolot eingesetzt, das rasch und mit geringem Aufwand Tiefenbestimmungen ermöglichte und so in einer Reihe von Querprofilen durch den Süd-Atlantik ein dichtes Netz von Tiefenbestimmungen herzustellen erlaubte, wobei sich zeigte, daß das Relief des Meeresbodens viel lebhafter ist, als man bis dahin angenommen hatte. Sodann sollten durch laufende Probeentnahmen aus verschiedenen Tiefen die Strömungs-, Temperatur- und Salzgehaltsverhältnisse in der gewaltigen Wassermasse des Süd-Atlantik geklärt werden. Außerdem sollten nicht nur einfache Dredge-Proben, sondern auch Bohrprofile vom Grund des Ozeans geborgen werden, wobei man schon bis über einen Meter tief in den Ozeanboden einzudringen vermochte.

Während des zweiten Weltkrieges hat die amerikanische Kriegsmarine im Interesse der Kriegserfordernisse, auf den Meteorererfahrungen aufbauend, ozeanographische Aufnahmen im Pazifik durchführen lassen, mit einer gegenüber dem Meteor weiterentwickelten apparativen Ausstattung. Auch hier zeigte sich, daß das Bodenrelief viel lebhafter war als vermutet war, daß auch hier im ozeanischen Wasserkörper recht differenzierte Bedingungen herrschen. In den Jahren seit dem Ende des zweiten Weltkrieges wurde, auf diesen Erfahrungen weiterbauend, die ozeanographische Forschung in internationaler Zusammenarbeit außerordentlich stark intensiviert. Es wurden ozeanographische Forschungsschiffe mit stetig verbesserter und leistungsfähigerer Apparatur ausgerüstet. Auch die Bundesrepublik hat sich mit einem zweiten Meteor in diese Forschungsprogramme eingeschaltet. Atlantik und Pazifik waren vorwiegend Forschungsdomäne der USA, während der Indik vorwiegend Forschungsbereich der Sowjetunion war.

Die Süd-Atlantik-Expedition des Meteor von 1925/27 hatte festgestellt, daß ein 2000 - 3000 m hoch aufragender Gebirgszug in der Mittelachse des Süd-Atlantik durchzieht und die 4000 - 5000 m tiefen Becken im Westen und Osten voneinander trennt. Was man zunächst als eine Besonderheit des Süd-

Atlantik betrachtet hatte, erwies sich nunmehr als eine für sämtliche großen Ozeane typische Erscheinung. Nicht nur setzt sich der süd-atlantische Mittelrücken durch den Nord-Atlantik bis zur Arktis hin fort, wobei die Vulkaninsel Island ein besonders hoch aufragender Teil dieses Mittelrückens ist, sondern auch die anderen Ozeane haben ähnliche Mittelrücken. Man erkannte ein mehr oder weniger zusammenhängendes, alle Ozeane durchziehendes submarines Gebirgssystem ozeanischer Mittelrücken.

Dieses submarine Gebirgssystem, das zwar auch Höhen von 2000 - 3000 m über den eigentlichen Tiefseebecken erreicht, hat nun freilich mit den Gebirgszügen der Festländer, die ja weitgehend von mächtigen Sedimentär-Formationen aufgebaut sind, gar nichts zu tun. Es sind in der Hauptsache von Basalt aufgebaute Höhenrücken, die nur eine wenig mächtige Decke relativ junger ozeanischer Sedimente tragen. Vorkretacische Sedimente sind über den Mittelrücken nirgendwo gefunden worden. Das ist eine neue, nunmehr ganz handgreifliche Bestätigung dafür, daß die Ozeanböden keine, den Kontinenten vergleichbare Sial-Kruste haben. In der zentralen Firstlinie der Mittelrücken konnte fast überall eine schmale Grabenspalte festgestellt werden. Des weiteren zeigte sich, daß die Basalte auf den Flanken, seitlich der Zentralachse mit ihrem Firstgraben, in der Zentralachse parallelen Streifen angeordnet sind, die umso älter sind, je weiter sie von der Zentralachse entfernt sind. Es ist ein auf beiden Flanken symmetrisches, paralleles Streifenmuster vorhanden. Jedem Streifen auf der einen Flanke entspricht ein gleichaltriger Streifen auf der anderen Flanke.

Diese Situation wurde durch die Untersuchung der Sedimentdecke über dem Mittelrücken bestätigt. Über der Zentralachse fehlen Sedimente ganz oder, wenn solche vorhanden sind, sind es pleistozäne Sedimente. In dem beidseitig anschließenden Streifen beginnt das Sedimentprofil im Miozän, noch weiter seitlich auf den Flanken setzt das Profil schon im Oligozän, weiter flankenwärts im Eozän, sodann im Paleozän und in den randlichen Flankenpartien in der Oberkreide ein. Je weiter seitwärts auf den Flanken, desto früher konnte auf ihnen die Sedimentation beginnen, desto länger also sind sie schon am Ozeangrund exponiert.

Aus diesem Befund leitete man die Hypothese von der Ausweitung der Meeresböden ab. Die Grabenspalte in der zentralen Firstlinie wird als Zerrgraben

gedeutet, in dem die Kruste aufgerissen ist und durch den daher Basaltlava aus der Tiefe aufdringen und ausfließen kann. Sie kühlt ab und verfestigt sich am Ozeangrund relativ rasch. Bleibt die Zerrbeanspruchung bestehen, wird die Zerrspalte immer wieder aufgerissen, neu aufdringende Basaltlava schiebt die zuvor entstandenen Firstpartien auseinander, so daß im Zentralstreifen immer die jüngsten Ergüsse liegen und die zuvor gebildete Basalte umso weiter flankenwärts abgeschoben sind, je älter sie sind. Im Fortgang solchen Geschehens muß es schließlich zu dem von parallelen Streifen aufgebauten Mittelrücken kommen, dessen zentralen Teile durch die hochdringende Basaltlava am höchsten herausgehoben sind, während die älteren, flankenwärtigen Streifen infolge isostatischer Ausgleichsbewegung langsam einsinken, so daß die Flanken seitwärts abfallen und an den Rändern in die Tiefseebecken auslaufen. Sowohl die Altersbestimmungen, die man an den Basalten machen konnte, wie auch das oberkretacische Alter der ältesten Sedimente in den Randpartien des Mittelrückens geben ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Mittelrückenachse eines Ozeans sich verbreitert. Von beiden Befunden (Alter der Basalte und Alter der ältesten Sedimente) konnte man mittlere Werte der ozeanischen Ausweitung von ungefähr 4 cm pro Jahr errechnen. Ein solcher Wert stimmt auch mit der Breite des Süd-Atlantik, dessen Entstehungszeit in der Unterkreide ziemlich genau festliegt, d.h. mit der Entfernung von Südamerika und Afrika recht gut überein. Dabei handelt es sich selbstredend nur um Mittel- und Näherungswerte. Es ist unwahrscheinlich, daß die Ausweitung eines Ozeans stets in der gleichen Geschwindigkeit abgelaufen ist; es wechselten wohl Phasen etwas beschleunigter und mehr verlangsamter Bewegung. Außerdem bestehen sicherlich auch Differenzen zwischen den verschiedenen Ozeanen. Als Ergebnis einer solchen Ausweitung der Ozeanböden werden die begrenzenden Kontinentaltafeln auseinandergeschoben. Die Kontinentaldrift ergibt sich hier also gewissermaßen als ein Nebenergebnis, als eine Folge der Analyse der ozeanischen Mittelrücken.

Wenn sich die Ozeane stetig erweitern, also immer neue ozeanische Kruste gebildet wird, wo bleiben dann schließlich die kontinentalen Sial-Tafeln? Die gelegentlich, vor allem von physikalischer Seite her vertretene Hypothese (P. JORDAN), daß im Lauf der Erdgeschichte das Volumen des Erdkörpers zugenommen und infolgedessen auch seine Oberfläche sich vergrößert

habe, die Ozeanausweitung also eine Folge dieses Vorganges wäre, brauchen wir nicht zu diskutieren. Es gibt keine erdgeschichtlichen Befunde, durch welche diese These gestützt werden kann.

Die Antwort auf diese Frage kam wieder von der Erdbebenkunde. In den erdbebenreichen Zonen des Pazifik-Randes, vor allem im süd-amerikanischen Andenrand und in den ostasiatischen Inselbögen von Japan bis zu den Philippinen, zeigte sich, als man Lage und Tiefe sämtlicher registrierter und untersuchter Erdbeben zusammenstellte, daß die Tiefe der Erdbebenherde vom Ozeanrand gegen den Kontinent gleichmäßig zunimmt. Wenn am Ozeanrand im wesentlichen Flachbeben mit Herdtiefen von 20 - 40 km registriert werden, so rücken die Erdbebenherde kontinentwärts immer tiefer bis zu Tiefbeben, deren Herde 200, 300 km und noch tiefer liegen. Die Erdbebenherde sind auf einer kontinentwärts, teils stärker, teils schwächer einfallenden Fläche angeordnet, die man nach dem Erdbebenforscher BENIOFF die Benioff-Fläche nennt. Tektonische Beben -- um solche handelt es sich dabei; für vulkanische Beben gelten andere Regeln -- entstehen dadurch, daß innerhalb der Erdkruste zwei Krustenteile aneinander vorbeigepreßt werden. In der Grenzfläche beider Massen entstehen dadurch Spannungen, die, wenn ein gewisser Schwellenwert überschritten wird, eine ruckartige Bewegung, d.h. ein Erdbeben auslösen. Auf dieser Tatsache der Spannungszunahme im Grenzbereich zweier sich gegeneinander bewogender Massen beruhen die Versuche einer Erdbeben-Voraussage.

Die Benioff-Fläche im südamerikanischen Andenrand und im ostasiatischen Inselbogen-Rand zeigt also an, daß hier ozeanische Kruste des Pazifik unter die kontinentale Sial-Kruste hinuntergepreßt, hinuntergeschoben wird, um dann schließlich infolge der Temperaturzunahme in den größeren Tiefen wieder in den Erdmantel eingeschmolzen zu werden. Der Bildung neuer ozeanischer Kruste von den Mittelrücken aus steht also ein ältere ozeanische Krustenabschnitte wieder auflösendes Eintauchen gegenüber. Krustenteile werden hier in die Tiefe eingesaugt. Im Zug der Aufheizung bei diesem Eingesaugtwerden, entstehen aufschmelzende Magma-Herde. Daher kommt es zu einer starken vulkanischen Aktivität oberhalb der eintauchenden Benioff-Fläche, wie sie für die Anden und die ostasiatischen Inselbögen bezeichnend ist.

In etwas anderer Form spielt sich der gleiche Vorgang in dem mediterranen, alpinen Gebirgsgürtel ab. Hier treffen die beiden Sialtafeln von Gondwana und Eurasia gegeneinander, wobei der Rand der einen unter die andere hinuntergepreßt wird. Die mächtige Folge sedimentärer Formationen wird dadurch entwurzelt und über dem sich verengenden Raum abgeschert und zu Deckenstapeln übereinandergeschoben, so wie das E. KRAUS auf Beobachtungen des Alpenbaues in seiner Verschluckungshypothese ganz ähnlich schon in den vierziger Jahren ausgeführt hatte.

Nimmt man die beiden Phänomene, die Bildung neuer Ozeankruste in den Mittelrücken und das Eintauchen und Wiedereinschmelzen von Ozeankruste in den Benioff-Zonen und dem alpinen Gebirgsgürtel zusammen, so kommt man zu der Vorstellung von subkrustalen Kreisströmen mit einem aufsteigenden Ast in den ozeanischen Mittelrücken, in dem die aufdringenden Massen z.T. nach der Oberfläche ausfließen, die Mittelrücken bildend, z.T. seitlich abfließen, und einem absteigenden Ast, in dem die seitwärts abfließenden Massen wieder in die Tiefe eingesaugt werden. Diese Kreisströme werden als thermisch verursachte Konvektionsströme und Konvektionszellen gedeutet. Die Kontinentaldrift ist unmittelbare Folge dieser subkrustalen Vorgänge. Sie ist damit nicht nur bestätigt, sondern sie ist nun auch ursächlich in überzeugender Weise begründet.

Damit sind wir bei dem aus der Analyse der ozeanischen Mittelrücken entwickelten Modell der modernen Plattentektonik, dem sich die Erfahrungen des Paläomagnetismus, der Vulkanologie, der Erdbebenforschung, die unabhängig davon und von ganz anderen Fragestellungen ausgehend gewonnen sind, widerspruchslös und damit bestätigend einfügen. Diesem Modell eignet daher eine starke Überzeugungskraft. Wenn sich die Plattentektonik als eine völlig neue, von der Ozeanographie her entwickelte geotektonische Synthese versteht, so sollte man darüber doch nicht vergessen, daß HOLMES und JOLY, daß die Alpengeologen AMPFERER und SCHWINNER mit ihren Vorstellungen über die Bedeutung subkrustaler Strömungen für die Gebirgsbildung die Zusammenhänge schon ganz in der Richtung auf das plattentektonische Modell hin gesehen haben und daß E. KRAUS in seiner Verschluckungshypothese eine Vorstellung entwickelt hat, welche das Modell der Plattentektonik schon vorweggenommen hat.

8. Das plattentektonische Modell und die geologische Wirklichkeit

Das plattentektonische Modell, das eine Kontinentaldrift so möchte man fast sagen geradezu erzwingt, ist logisch in sich geschlossen und hat eine starke Überzeugungskraft, zumal da die Ergebnisse ganz anderer, von dem Ausgangspunkt der Plattentektonik unabhängiger Forschungsbereiche sich nahtlos diesem Konzept einfügen. Das plattentektonische Konzept hat von der Ozeanographie, der Erdbebenkunde, der Vulkanologie, dem Paläomagnetismus her eine sehr viel breitere und umfassendere Grundlage als die Kontraktionstheorie hatte. Sie ist, da in ihrer Synthese die Ergebnisse ganz verschiedener Forschungsbereiche sich zusammenfügen, ein entscheidender Erkenntnisfortschritt gegenüber der alten Kontraktionstheorie. Sie ist aber auch durch die neue Begründung der Kontinentaldrift ein wesentlicher Fortschritt über den ursprünglichen Ansatz von WEGENER hinaus. Und nach dieser nunmehr möglichen Begründung sollte man konsequenter nicht mehr von einer Kontinentaldrift sprechen. Es sind ja nicht Sial-Tafeln, die über einem mehr oder weniger passiv indifferentem Untergrund driften, sondern es sind die subkrustalen Vorgänge, durch die die Sial-Tafeln nun verschoben, mitgeschleppt werden. Man sollte vielmehr von der Kontinental-Verschiebung reden.

Die Stärke der neuen plattentektonischen Theorie gegenüber WEGENER liegt darin, daß der Vorgang der Platten-Verschiebung in einen größeren ursächlichen Zusammenhang einbezogen ist. Aus diesem Grunde wurde sie auch so wie sie ausgesprochen und formuliert war, von der Geologie übernommen. Man sollte aber nicht verkennen, daß die Theorie letztlich ein aus dem Verhalten der ozeanischen Mittelrücken abgeleitetes, abstrahiertes Modell ist, das aus einem heutigen Zustand eine Entwicklung in die Vergangenheit zurückprojiziert, für das daher der erdgeschichtliche Werdegang, die paläogeographischen und regional-geologischen Zusammenhänge keine Rolle spielen. Es ist letztlich eine deduzierte, in der Wirklichkeit nicht verifizierte Konstruktion. Die Theorie ist von Geophysikern, d.h. im Rahmen des physikalischen, auf eine absolute, vom Raum und Zeit unabhängige Kausalitätsbeziehung abgestellten Denkschemas konzipiert. Es fehlt ihr der konkrete Realitätsbezug. Das ist ihre Schwäche, bzw. ihr Mangel. WEGENER, der von den paläogeographischen, paläoklimatischen und regional-geologischen Zusammenhängen ausging und diese Befunde in einem Zusammenhang zu bringen suchte, war wirklichkeitsnäher.

Es bleibt daher die Aufgabe, das in sich schlüssige Modell vor der erdgeschichtlichen und regional-geologischen Wirklichkeit zu prüfen und, sofern es sich vor der Wirklichkeit bewährt, zu untersuchen, in welcher Weise das Modell im konkreten Einzelfall sich jeweils verwirklicht hat. Modelle, die auf einen absoluten Kausal-Mechanismus reduziert sind, existieren ja in der Wirklichkeit nicht. In ihr gibt es nur die individualisierten, in ihren jeweiligen Zeit- und Raum-Bezug eingebundenen und dadurch spezifisch ausgestalteten Abläufe. Das Modell hat nur die Aufgabe, einen Weg zum Verständnis der Zusammenhänge im Geschehensablauf und damit auch zu dessen Deutung zu weisen.

Wir stellen zunächst die bemerkenswerte Tatsache fest, daß die heutigen Ozeanböden durchweg jung sind. Nirgendwo sind in den Sedimentfolgen des Ozeangrundes vor-mesozoische Ablagerungen gefunden worden. Die Tatsache ist durchaus verständlich, da ja der Bildung neuer Ozeankruste das Einschmelzen von Ozeankruste gegenübersteht. Es ist hier ein Kreislauf vorhanden, dank dessen Zeugnisse vor-mesozoischer Abläufe verschwunden sind. In der Tat erfaßt ja auch das plattentektonische Modell, das die Bildung und Ausweitung des Atlantik und Indik und den Zerfall eines Pangäa-Groß-Kontinentes beschreibt ausschließlich den mesozoisch-känozoischen Abschnitt des erdgeschichtlichen Ablaufes.

Dem mesozoisch-känozoischen Pangäa-Zerfall geht eine gegenteilige Entwicklung des Zusammenwachsens von einzelnen Kontinentalkernen zur Pangäa voraus. Der Gondwana-Kontinent ist an der Wende von Präkambrium zu Paläozoikum durch eine große Gebirgsbildung aus einigen Kontinentalkernen zusammengewachsen, die ihrerseits aus kleineren Kernen zusammengeschlossen worden sind. Dieser Gondwana-Groß-Kontinent ist bis zum Ende des Paläozoikums erhalten geblieben. Auch der große Nordkontinent Laurasia ist im jüngeren Präkambrium zu einem einheitlichen Großkontinent zusammengewachsen. Anders als beim Gondwana-Kontinent ist er aber an der Wende von Präkambrium zu Kambrium durch die Bildung der nord-atlantischen Geosynklinale (Japetus-Ozean) und der uralischen Geosynklinale in drei Teilkontinente zerfallen, welche freilich durch die Gebirgsbildungen des Paläozoikums wieder miteinander zum Groß-Kontinent sich verschweißten. Und in der jüngsten paläozoischen, der variszischen Gebirgsbildung ist dieser Laurasia-Kontinent in seinem südwestlichen Teil mit dem Gondwana-Kontinent verschweißt

worden, so daß am Ende des Paläozoikums eine zusammenhängende Pangäa vorhanden war.

Man könnte, wenn man das plattentektonische Modell zugrunde legt, diese Pangäa-Konzentration verstehen als Folge der ozeanischen Ausweitung eines großen Ur-Pazifik der die im Lauf des Präkambriums entstandenen größeren und kleineren Sial-Tafeln vor seinem Ost- und Westrand wegschob, so daß diese schließlich in einer der pazifischen Wasser-Hemisphäre gegenüber liegenden Land-Hemisphäre als Pangäa zusammengedrängt waren. Das einen solchen Vorgang bewirkende subkrustale Strömungssystem müßte einen völlig anderen Charakter gehabt haben als das seit dem Mesozoikum entwickelte und müßte sehr großräumig gewesen sein. Ein solches einheitlich großräumiges Strömungssystem im Erdinnern als bestimmendes Element für die Früh-Entwicklung des Erdkörpers ist aus theoretischen Gründen gelegentlich vermutet und konstruiert worden. In der bis zum Paläozoikum sich abspielenden Pangäa-Konzentration der der pazifischen Wasser-Hemisphäre gegenüber liegenden Land-Hemisphäre könnte man vielleicht eine Bestätigung einer solchen Konstruktion erkennen. Doch mehr als theoretische Spekulationen sind vorläufig hier nicht möglich.

Weshalb ist diese Entwicklung, die offenbar durch erstaunlich lange Zeiträume hindurch gleichsinnig verlief, die also eine recht große Stabilität besaß, an der Wende von Paläozoikum zu Mesozoikum in ihr Gegenteil umgeschlagen? Weshalb hat im Nordteil dieser Pangäa, in Laurasia, anders als im Gondwana-Südteil, schon im Paläozoikum eine Zerfallstendenz sich bemerkbar gemacht, die freilich nur Episode blieb und in erneuter Verschweißung endete?

Wie soll man sich vorstellen, daß innerhalb dieser Pangäa nun plötzlich langgestreckte Grabenzonen einbrechen, in denen Basaltlava aufdringt, die Grabenschultern auseinandertreibt, sich zu einem Mittelrücken weiterbildet und den Graben in einen sich ausweitenden Ozean umwandelt? Das setzt ja doch voraus, daß das seit langer erdgeschichtlicher Vorzeit bestehende und stabilisierte Strömungssystem unter der Pangäa-Decke relativ rasch sich durchgreifend umgebildet hat. Welches ist der eine solche völlig neue Entwicklung auslösende Faktor. Es ist lehrreich, in diesem Zusammenhang einen Blick auf das große ost-afrikanische Grabensystem zu werfen. Dessen Anlage reicht offenbar weit ins Präkambrium zurück und es ist bis in die

jüngste erdgeschichtliche Vergangenheit immer wieder reaktiviert worden, wobei auch gewaltige Lava-Massen ausgeflossen sind. Man hat gelegentlich gemeint, hier liege ein erster Ansatz zu künftiger Ozeanbildung und Abtrennung Ostafrikas vom afrikanischen Kontinent vor. Es gibt hier aber keine Anzeichen einer auf Ausweitung deutenden Zerrung, vielmehr scheint eher eine Tendenz zur Einengung vorhanden zu sein (McCONNELL). Es scheint, daß der Graben ein Scheiteleinbruch über einer Aufwölbung des Untergrundes ist (ILLIES). Wenn man die alte Anlage berücksichtigt und gleichzeitig die Tatsache, daß die ungefähr in der Mittelachse der Land-Hemisphäre liegt, könnte man sich vorstellen, daß die im Rahmen des alten großräumigen Strömungssystems vom Pazifik nach Westen und Osten unter die Pangäa abfließenden subkrustalen Strömungen sich hier in der Pangäa-Mittelachse getroffen und gestaut haben und so eine Krustenaufwölbung hervorriefen, deren Scheitel schließlich einbrach. Das ostafrikanische Grabensystem wäre demnach in seiner Anlage der Pangäa-Konzentration zuzuordnen. Solche weit gespannten Grabensysteme sind also durchaus nicht automatisch ein Ansatz zum Zerfall und Auseinanderdriften der Pangäa. Die Grabensysteme, die sich zum Atlantik und Indik weiterbildeten und den Zerfall der Pangäa bewirkten, müssen in anderer Weise und aus anderen Gründen entstanden sein. Der Fortgang der seit dem Präkambrium herrschenden Entwicklung hätte allenfalls dem ostafrikanischen Grabensystem vergleichbare Phänomene hervorrufen können, nicht aber den Umschlag zum Zerfall.

Die paläoklimatischen Daten lassen erkennen, daß der Pangäa-Komplex seit dem Kambrium (ältere eindeutige Zeugnisse gibt es nicht) sich von Süden nach Norden verlagert hat. Das vollzog sich zeitenweise beschleunigt, zeitenweise verlangsamt, ist aber immer erkennbar. Die Ursache davon kennen wir nicht. Wir können nur die Tatsache als solche registrieren. Da die Sial-Tafel ja tief in die Sima-Unterlage eingetaucht ist, muß eine solche Schub-Bewegung vom Nordrand her stark gebremst werden. Die Folge ist -- darauf hat WUNDERLICH hingewiesen -- eine Querdehnung, die am stärksten ganz im Norden ist und nach Süden mehr und mehr abklingt. In der Folge werden schließlich nach der Schubrichtung, d.h. nord-südlich orientierte Dehnspalten vom Nordrand her einreißen, die aber nicht bis in den Südteil fortsetzen. So kam es im Paläozoikum zu der nord-atlantischen und uralischen Geosynklinale in Laurasia, während der Gondwana-Kontinent intakt blieb. Infolge einer Verlangsamung des Nordschubs während des

jüngeren Paläozoikums, die auch durch die paläoklimatischen Daten nahegelegt wird, verringerte die Querdehnung. Die vom pazifischen Ozean ausgehende Ausweitung konnte daher diese Dehnspalten wieder zusammenschieben und den Laurasia-Komplex erneut verschweißen in den paläozoischen Orogenesen, wobei die Gebirgsbildung im nord-atlantischen Raum auch Laurasia und Gondwana miteinander verschweißte.

Die auf die allgemeinen Grundzüge vereinfachte Entwicklung zur Pangäa-Konzentration während des Paläozoikums läßt sich somit im Rahmen des plattentektonischen Modells durchaus deuten, wenn man dieses dahin modifiziert, daß ein ganz anderes, sehr großräumiges einheitliches subkrustales Strömungssystem vorhanden war als heute, mit nur einer ozeanischen Ausweitungssachse im Ur-Pazifik.

9. Der mesozoisch-känozoische Zerfall der Pangäa

In der Pangäa, wie sie am Ende des Paläozoikums bestand, waren Gondwana und Laurasia im Westen miteinander verschweißt, während von Osten her der Pazifik zwischen Laurasia und Gondwana weit westwärts vorstieß. Indien lag als Teil Gondwanas südlich dieser Pazifik-Ausbuchtung, unmittelbar verbunden mit Afrika. Vermutlich war auch eine südwärts zwischen Afro-India und Australia vorspringende Bucht des Pazifiks vorhanden. Der süd-amerikanisch-afro-indische und australische Komplex war im Süden mit der antarktischen Masse verbunden.

Der Nordschub dieser ganzen laurasisch-gondwanischen Landmasse war, soweit man aus den paläoklimatischen Zeugnissen schließen kann, in der Zeit des jüngeren Paläozoikums merkbar verlangsamt, scheint sich aber vom ausgehenden Paläozoikum an und während des älteren Mesozoikums wieder beschleunigt zu haben. Ähnlich wie wir das für die paläozoische Entwicklung vermutet haben, mußte auch jetzt eine von Norden her wirkende Querdehnung auftreten. So riß von Norden her Laurasia in den alten Narben des uralischen und nord-atlantischen Orogens wieder auf.

Der heutige Ural ist ja nur ein stehengebliebener Rest des ursprünglichen Gebirges; seine Osthälfte ist eingebrochen in der westsibirischen Senke, in der eine mesozoisch-alttertiäre Formationsfolge epirogenes Absinken dokumentiert. Nach TAMRAZYAN soll der sibirische Block etwas gegen Osten

abgedriftet sein, wodurch sich die osturalische, bzw. westsibirische Senke als Dehn- oder Zerrspalte ausweisen würde. Diese Spalte hat sich freilich nicht zu einem endgültigen Ozean mit Mittelrücken weitergebildet, der sibirische Ostschiebung ist rasch wieder zum Stillstand gekommen. Möglicherweise haben die jungen mediterranen Gebirgszüge (Himalaya-Zug usw.) den osteuropäischen und sibirischen Block verklammert.

Auch im Gondwana-Ostabschnitt, der ja im Norden von der breiten Westausbuchtung des Pazifik begrenzt wird, macht sich die Querdehnung bemerkbar. Marines Oberperm in Madagaskar zeigt ein erstes Vordringen des Meeres nach Süden östlich von Afrika an. Marine Trias- und Jura-Ablagerungen in Madagaskar und Ost-Afrika, in größerer Ausdehnung sodann in der Kreide beweisen ein zwischen Afrika und Indien sich Hineinschiebendes, trennendes Meer, das von Norden her eindrang und als die Folge einer von Norden her einreißenden Zerrspalte verstanden werden kann. Der relativ kleine indische Block war dadurch vom afrikanischen Komplex abgerissen und konnte infolge seiner geringeren Größe und wenig breiten Nordfront relativ rasch nach Norden vorgeschoben werden gegen die asiatische Landmasse. Der Zerfall Ost-Gondwanas durch eine rasch sich erweiternde Dehnspalte setzte also schon im oberen Perm ein und setzte sich verstärkt während des Mesozoikums fort.

Ganz anders ist die Situation im Westabschnitt der Pangäa, wo durch die Verschweißung von Laurasia und Gondwana eine viel ausgedehntere und kompaktere Sialtafel vorhanden war. In der nordatlantischen Narbe riß von Norden her eine Dehnspalte auf, den nordamerikanischen Block vom eurasiatischen trennend. Im Jura ist der Nordatlantik als Meeresraum, vermutlich viel schmaler als heute, sicher vorhanden; die vorbereitende Querdehnung hat wohl schon früher, in der Trias, eingesetzt. Diese Spalte wurde aber, den variszischen Strukturen folgend, im Süden gegen Westen abgelenkt, ohne in den Gondwana-Komplex einzutreten. Sie tritt über den heutigen Raum des mittelamerikanischen Isthmus in den Pazifik hinein aus. Das wird bestätigt durch den Nachweis eines marinen Faunen-Austausches zwischen dem andinen Jura und dem von Mittel- und Westeuropa schon vom Lias an (A. v. HILLENBRANDT). In die gleiche Richtung weisen die am Westrand des mittelamerikanischen Isthmus herausgehobenen Schollen des Nicoya-Komplexes. Sie zeigen eine flachmeerische Entwicklung dieses Raumes im Jura an, die

während der Kreide zu einer voll-ozeanischen Entwicklung mit submarinen basischen Ergüssen weitergeht. (SCHMIDT-EFFING). Nordamerika wurde also als selbständige Sial-Tafel spätestens vom Jura an vom Pangäa-Komplex abgetrennt.

Mit der Bildung der durch die Querdehnung entstandenen Zerrspalten zwischen Afrika und Indien und zwischen Europa und Nordamerika, in denen die Sialtafel auseinandergerissen wurde, wurde der Wärme fluß im tieferen Untergrund verändert. Im Zug einer verstärkten Wärme-Abgabe in den Zerrspalten und der Entlastung durch das Fehlen der Sialdecke kam es in ihnen zu basaltischen Lava-Ergüssen, welche die Bildung eines Mittelrückens einleiteten. Diese und die in ihnen sich herausbildende Gesetzmäßigkeit wandelten die Zerrspalten-Anlagen in sich ausweitende ozeanische Räume um. Das ursprünglich großräumige, einheitliche subkrustale Strömungssystem differenzierte sich zu den enger räumigen Konvektionszellen, welche die mesozoisch-känozoische Entwicklung der Landhemisphäre mit dem Indik und dem Nord-Atlantik kennzeichnen. Die ozeanischen Mittelrücken sind also nicht die primäre Ursache für den Zerfall der Pangäa. Ihre spontane Entstehung im Rahmen des zuvor vorhandenen, zur Pangäa-Konzentration führenden, großräumigen subkrustalen Strömungssystems ist kaum begründbar. Sie sind sekundäre Bildungen, ausgelöst durch die thermischen Ungleichgewichte, die im Zug der durch Querdehnung entstandenen Zerrspalten hervorgerufen waren. Einmal vorhanden - bestimmten sie aber durch die ihnen innewohnende Gesetzmäßigkeit die weitere Ausgestaltung.

Der Mittelrücken des Nord-Atlantik bog zunächst entsprechend dem Verlauf der nord-atlantischen Zerrspalte in westliche Richtung zum Panama-Isthmus hin ab, im Pazifik vermutlich in den ost-pazifischen Mittelrücken verlaufend. In den herausgehobenen Schollen des Nicoya-Komplexes sind noch Fragmente dieses alten Mittelrückens erhalten. Die mächtigen Folgen voll-ozeanischer Formationen im pazifischen Randbereich von Kolumbien werden in diesem Zusammenhang verständlich.

Der Süd-Atlantik und sein Mittelrücken sind sonach ursprünglich nicht die Fortsetzung des Nord-Atlantik, wenn die hier gegebene Deutung des Nord-Atlantik zutrifft. Das wird durch die Entwicklung des Süd-Atlantik unmittelbar bestätigt. In der Zeit, in der die nord-atlantische, zum Ozean sich weiterbildende Zerrspalte entstand, war der ursprüngliche Zusammen-

hang Süd-Amerika - Afrika noch vorhanden, eingeschlossen zwischen dem Süd-Pazifik und seiner ost-pazifischen Mittelschwelle einer- und der Mittelschwelle des Indik, dem Carlsberggrücken andererseits. Weshalb es an der Wende von Jura zu Kreide in diesem Komplex zum Einbruch einer sich danach zum Süd-Atlantik ausweitenden Spalte gekommen ist, ist schwer zu sagen. Man sollte hier eher Einengung als Dehnung und Ausweitung erwarten. Man könnte sich aber vielleicht folgendes vorstellen: Die von Ost und West, von den beiden Mittelrücken her kommenden subkrustalen Strömungen haben da, wo sie sich trafen, sich gestaut, die Sial-Decke aufgebeult und schließlich aufgebrochen, wodurch sie, sich Luft schaffend, nach oben ausflossen. Die während des Jura sich abspielenden gewaltigen Basaltergüsse des Paraná-, Maranhão- und Amazonas-Beckens könnten in diese Richtung weisen. Im Zusammenhang mit diesen gewaltigen Oberflächenenergüssen, die also ein spätes Analogon zu dem ostafrikanischen Grabensystem wären, könnte dann, parallel zu der N-S verlaufenden Ausflußzone, der Graben der Süd-Atlantik-Spalte an der Wende von Jura zu Kreide eingebrochen sein, zunächst als intrakontinentaler Graben mit einer Füllung von neokomen Süßwasser-Ablagerungen. Diese Spalte ist also nicht wie die des Nord-Atlantik und des Indik als Dehnspalte entstanden. Das geht schon daraus hervor, daß sie nicht vom Norden her eingerissen ist, sondern als intrakontinentaler Graben entstand, der sich von Süden her erweiterte. Vom Süden her ist vom Apt an das Meer eingedrungen, während im Norden der Zusammenhang Süd-Amerika-Afrika noch bis ins Turon erhalten geblieben ist. Durch den von West und Ost weiterhin kommenden Material-Nachschub verlagerte sich der weitere Ausfluß in diese eingebrochene Schwächezone, während die ursprüngliche Ausflußzone durch die mächtigen und ausgedehnten Basaltdecken verschweißt war. Damit konnte sich nun auch hier eine ozeanische Entwicklung mit Mittelrücken konstituieren.

Der Süd-Atlantik ist daher unabhängig vom Nord-Atlantik und aus einem anderen Ursachen-Zusammenhang heraus entstanden. Mit zunehmender Ausweitung des Süd-Atlantik riß dann schließlich im Turon der im Norden noch erhalten gebliebene Zusammenhang zwischen Süd-Amerika und Afrika auf. Im ersten Ansatz entstand der in der Fortsetzung des Süd-Atlantik liegende Benue-Graben in Kamerun. Dieser bildete sich indessen nicht weiter, da offenbar im Zug der Ost-West-Verschiebung Süd-Amerikas eine

ost-westlich verlaufende Scherspalte geringeren Widerstand leistete. Sie traf auf die Nord-Atlantik-Spalte. So kam es zu dem auffälligen sigmoidalen Schwung des Atlantik, der kaum verständlich ist, wenn man den Atlantik als primär einheitliche Bildung auffaßt.

Der aktive süd-atlantische Mittelrücken bildete sich in das erst spät, oberkretacisch aufgerissene Verbindungsstück zwischen Nord- und Süd-Atlantik weiter, so daß nunmehr erst der einheitlich durchgehende atlantische Mittelrücken entstand, von dem nun die beiden Amerikas gemeinsam nach Westen abgeschoben wurden. Damit riß nun auch die ursprüngliche Fortsetzung des Nord-Atlantik-Mittelrückens zu dem ost-pazifischen Mittelrücken auseinander. Ihre Bruchstücke sind die herausgeschobenen Schollen des Nicoya-Komplexes an dem Pazifikrand des Panama-Isthmus. Die von dem hier entwickelten Zusammenhang her leichter verständlich werden als sie es bisher waren.

10. Schlußbemerkungen

Wir müssen uns im Rahmen unseres Themas auf diese naturnotwendig etwas schematisierten Hauptzüge beschränken. Man könnte noch darauf hinweisen, daß die stratigraphische und fazielle Entwicklung der Sedimentfolgen im Pazifik eine erhebliche nordwärtige Verschiebung der Pazifikplatte gegen Nordost-Asien hin seit dem Mesozoikum anzeigt, daß die ost-pazifische Mittelschwelle sehr stark der pazifischen Amerika-Küste genähert ist und in Kalifornien in den kontinentalen Pazifikrand hineinstreicht, daß die Anden, neben dem Atlantik das Paradebeispiel der Plattentektonik, deren Modell-Vorstellungen zwar sich einfügen, daß im einzelnen aber die Zusammenhänge viel komplexer sind als das Modell erwarten läßt. Die Analyse dieser Befunde würde zeigen, daß sie sich dem hier entwickelten Rahmen-Zusammenhang einfügen. Man könnte zeigen, daß auch die Entwicklung der alpinen Geosynklinale und der alpinen Gebirgsbildung in diesen Rahmen sich nahtlos einfügt.

Wir müssen auf die den Rahmen dieses Aufsatzes sprengende Besprechung dieser Themen verzichten und fassen nur kurz noch zusammen.

Das Modell der Plattentektonik mit der von den ozeanischen Mittelrücken ausgehenden Ausweitung der Ozeane und der Bildung neuer Ozeankruste, der ein Wiedereintauchen und Einschmelzen von Ozeankruste gegenübersteht und

mit der daraus abgeleiteten Vorstellung von thermisch bedingten Konvektionszellen im Erdmantel, dieses Modell erweist sich als hilfreich und tragbar bei dem Versuch, die geotektonischen Zusammenhänge und die geotektonische Entwicklung während des Mesozoikums und Känozoikums zu verstehen und ursächlich zu deuten. Das verleiht dem Modell großen Erklärungswert und macht den hinter ihm stehenden Gedankengang sehr wahrscheinlich.

Das von jedem Raum- und Zeitbezug abgelöste Modell ist freilich zunächst nur ein formales Denkschema, das es ermöglicht, die Befunde im konkreten Einzelfall, der sich in einem nur ihm zugehörigen Raum- und Zeitbezug abspielt, zu ordnen, und damit die Art und Weise zu klären, in der dieses Modell im gegebenen Einzelfall konkret verwirklicht und mehr oder weniger stark abgewandelt ist. Dabei ist entscheidend, daß man nicht von dem heutigen Zustand ausgehend, diesen, indem man ihm das Modellschema unterschiebt, in einer Rückwärtsprojektion von der Gegenwart in die Vergangenheit erklärt, sondern daß man vielmehr, von den erdgeschichtlichen Anfängen beginnend, den tatsächlichen Entwicklungsgang zu rekonstruieren sucht und daran prüft, in welcher spezifischen Form das Modell sich konkretisiert hat. Die Geschichte des Atlantischen Ozeans illustriert besonders deutlich, zu welchen Fehlschlüssen man geführt wird, wenn man das Modell unbesehen an den heutigen Zustand anlegt. Wie alles in der Wirklichkeit ablaufende Geschehen, so spielt sich auch die erdgeschichtliche Entwicklung nicht in der Form zeit- und raum-unabhängiger Modelle, sondern in konkreten Einzelabläufen ab, deren jeder seine eigene, individuelle Note hat, bedingt durch die Ausgangssituation, aus der heraus er sich in seinem Raum entwickelt.

Des weiteren haben wir festzustellen, daß das auf dem Verhalten der ozeanischen Mittelrücken aufgebaute Modell nicht den primären ursächlichen Ansatz des Geschehens erfaßt, sondern nur dessen endgültige Ausgestaltung. Am Anfang als auslösende Ursache steht eine Zerrspalten- und Grabenbildung, welche erst die Voraussetzung für die Bildung der Mittelrücken und der im weiteren Verlauf von diesen diktierten Ausgestaltung schafft. Dieser erste, ursächliche Ansatz -- das zeigte der Vergleich von Nord- und Süd-Atlantik -- kann in verschiedener Weise verursacht sein. Auch hier gilt, daß die Rahmenbedingungen der Ausgangssituation in ihrem Raum- und

Zeit-Bezug die Art und Weise bestimmen, wie der Einzelfall sich verwirklicht und sich weiterbildet. Daher sollte man sich vor voreiligen Verallgemeinerungen hüten, wozu ein so einprägsames Modellschema, wie das aus den ozeanischen Mittelrücken abgeleitete plattentektonische Modell allzu leicht verleiten kann. Es ist z.B. durchaus nicht so, daß ein großes Grabensystem mit Lava-Ergüssen zwangsläufig zur Aufspaltung einer Kontinentaltafel durch Weiterbildung zu einem Mittelrücken und zu einem sich ausweitenden Ozean führt. Das ostafrikanische Grabensystem, dessen Anlage sich bis ins Präkambrium zurückverfolgen läßt, hat nie in seiner langen Geschichte eine in diese Richtung weisende Tendenz gezeigt. Die Dehnspalte, aus der der Carlsberg-Mittelrücken sich entwickelte und die die indische Tafel von der afro-indischen abspaltete, ist unabhängig vom ostafrikanischen Grabensystem und in anderer Lage entstanden.

Die vor-mesozoische, in der Pangäa-Konzentration kulminierende Entwicklung verhält sich genau gegenteilig zu dem mesozoisch-känozoischen Pangäa-Zerfall. Auch sie läßt sich im Rahmen des geotektonischen Modells deuten, setzt aber ein grundsätzlich anderes, einheitlich-großräumiges, subkrustales Strömungssystem mit nur einer Ausweitungsachse im Ur-Pazifik, in einer ähnlichen Form wie das z.B. O. AMPFERER sich vorgestellt hat, wie das auch später H. HESS ganz ähnlich auf Grund theoretischer Überlegungen konstruiert hat.

Die Bedingungen im Erdmantel sind zweifellos recht gleichförmig. Sie haben daher wohl ein erhebliches Beharrungsvermögen. Das vor-mesozoisch zu vermutende einheitlich-großräumige Strömungssystem hat offenbar durch sehr lange erdgeschichtliche Zeiträume -- zum mindesten während des gesamten Paläozoikums, aber wohl auch schon in jung-präkambriischen Zeiten -- mehr oder weniger unverändert bestanden. Aber das Beharrungsvermögen ist doch nicht so stark, daß es nicht durch irgendwelche zusätzlichen Einwirkungen überwunden werden könnte. An der Wende von Paläozoikum zu Mesozoikum entstand unter der Pangäa ein enger räumiges Strömungssystem, welches das ursprünglich globale System auf die pazifische Wasserhalbkugel zurückdrängte. Aber auch dieses neue, durch seine Konvektionszellen gekennzeichnete und vom Jura an mehr oder weniger stabilisierte System zeigt sich im einzelnen als wandlungsfähig, wie das deutlich vor allem am Durchbruch des Süd- zum Nord-Atlantik und der Herausbildung des durchgehenden atlantischen

Mittellrückens abzulesen ist. Es scheint, daß diese enger räumigen Konvektionszellen und die ihnen zugeordneten Mittelrücken ihre individuelle Geschichte haben, insofern als ihre aktive Ausweitungstendenz im Lauf erdgeschichtlicher Zeiträume sich allmählich abschwächt, um schließlich ganz abzuklingen, daß sie also, wie das auch H. HESS betont, eine beschränkte Lebensdauer haben. Das zeigt sich z.B. an dem Verhalten des süd- zum nordatlantischen Mittelrücken, ebenso auch in der Geschichte des Indik mit einem älteren östlichen -- zwischen Indien und Australien gelegenen -- und dem jüngeren, westlich Carlsberg-Mittelrücken (PILGER).

Ein Problem besonderer Art liegt darin, daß die jungen, aus dem Pangäa-Zerfall entstandenen Ozeane (Atlantik und Indik) die Pangäa-Fragmente einfach auseinandergeschoben haben, ohne deren Ränder nennenswert zu beeinflussen. Sie sind erdbeben-arm und haben keinen jungen Vulkanismus. Ebenso fehlen ihnen die jungen Gebirgsgürtel. Sie werden als passive Kontinentalränder bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind die pazifischen Kontinentalränder als erdbebenreiche Gebirgsgürtel mit aktivem Vulkanismus aktive Kontinentalränder. Man erklärt diesen Unterschied dadurch, daß man die Ränder des Pazifik als die Ränder einer Pazifik-Platte betrachtet, in den pazifischen Kontinentalrändern also zwei Platten aneinanderstoßen, während die Plattengrenzen zwischen den beiden amerikanischen Platten einerseits und der eurasiatischen und afrikanischen andererseits in die atlantische Mittelschwelle verlegt wird, der Kontinentalrand also keine Plattengrenze bildet, und ähnlich im Indik. Aber weshalb ist zwischen der neugebildeten ozeanischen Kruste von Atlantik und Indik und den umrandenden Kontinentaltafeln keine Plattengrenze?

Der amerikanische Pazifikrand ist ein stark zusammengeschobener Gebirgsrand über der unter die Kontinentaltafel sich einschiebenden Pazifik-Platte, offenbar also durch Zusammenschub und Einengung gekennzeichnet. Der ostasiatische Pazifikrand zeigt einen in Inselbögen aufgelösten Gebirgsrand, Dieser aber ist durch Meeresbecken von der asiatischen Tafel abgelöst, obwohl auch hier eine deutlich ausgeprägte Benioff-Zone zeigt, daß die Pazifik-Platte unter den Gebirgsrand hintergeschoben wird. Die randlichen Meeresbecken zwischen Kontinent und Inselbögen zeigen und dokumentieren eine Dehnungstendenz, also ein gegenteiliges Verhalten zu dem amerikanischen Pazifikrand. Auch hier wieder eine offene Frage, die zeigt, daß wir

uns vor allzu schematischer Verwendung der Modellvorstellung hüten müssen. Dieses Problem ist neuerdings von UYEDA diskutiert worden, der eine Antwort in den verschiedenen Bewegungstendenzen der amerikanischen und des asiatischen Kontinentes sucht.

Die Plattentektonik ist ein sehr junges geotektonisches Konzept. Sie hat sich zunächst vor allem unter geophysikalischen Gesichtspunkten konstituiert und entwickelt. Das von ihr erarbeitete Modellschema bietet offenbar einen guten Ansatz zum Verständnis der regional-geologischen Zusammenhänge und der Gebirgsbildung. Aber es ist eben doch nur ein sehr abstraktes Modell. Zu seiner regional-geologischen und erdgeschichtlichen Konkretisierung sind erst die ersten Schritte getan. Bei dieser Aufgabe, das Modell mit der erdgeschichtlichen und regional-geologischen Wirklichkeit auszufüllen, treten die eigentlichen und entscheidenden Probleme auf. Von dem Problem, die erdgeschichtlichen Zusammenhänge im Oberflächenbild der Erde zu klären, war WEGENER ausgegangen. Dieses Problem wieder aufzugreifen ist die Aufgabe der Geologie, die dafür heute dank der geophysikalischen Erkenntnisse über eine viel breitere und besser fundierte Grundlage verfügt, als WEGENER sie hatte.

11. Einige Literatur-Hinweise

Zur Plattentektonik sind in den vergangenen zwei Jahrzehnten so viele Bücher und Aufsätze in den einschlägigen Zeitschriften erschienen, daß schon die Aufzählung der Titel ein ganzes Buch füllen könnte. Im folgenden sind nur einige wenige Titel von allgemeinerem Interesse und mehr grundlegender Bedeutung erwähnt. Dabei weise ich vor allem auf das Buch von R. SCHÖNENBERG (Die Entstehung der Kontinente ...) hin, in dem die grundlegenden Aufsätze zur Begründung der Plattentektonik in deutscher Übersetzung zusammengestellt sind. Einen breiteren Raum in der folgenden Liste nehmen die Titel älterer Veröffentlichungen ein, die teils an WEGENER anschließen, teils unabhängig davon in der Vorgeschichte der Plattentektonik stehen. Gegenüber der heute so weit verbreiteten Tendenz, die Plattentektonik als etwas völlig Neues hinzustellen, erscheint es notwendig und gerecht, sich auch dieser, heute allzu leicht vergessenen Vorarbeit und Vorgeschichte bewußt zu sein.

- AMPFERER, O., 1906 Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen.
Jahrb. Geol. Reichsanst. Wien, Bd. 56, S. 539
- AMPFERER, O. & HAMMER, W., 1911 Geologischer Querschnitt durch die Ostalpen vom Allgäu bis zum Gardasee. -- Jahrb. Geol. Reichsanst. Wien, Bd. 61, S. 531
- ARGAND, E., 1922 La tectonique de l'Asie. -- Comptes rendus des 13. Internat. Geol. Congr. Brüssel
- BEURLIN, K., 1974 Die geologische Entwicklung des Atlantischen Ozeans. Geotekton. Forschungen, Bd. 46
- BUCHER, W.H., 1933 The deformation of the Earth's crust. Princeton Univ. Press, Princeton
- CREER, K.M., 1964 Palaeomagnetic data and DU TOIT's reconstruction of Gondwanaland. -- Nature Bd. 204
- DACQUÉ, E., 1915 Grundlagen und Methoden der Paläogeographie. Jena
- DU TOIT, A.L., 1937 Our wandering continents. -- Edinburgh 1937

- FROIDEVAUX, C. & NATAF, A.C., 1981 Continental drift: What driving mechanism? -- Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 166
- GUTENBERG, B. & RICHTER, C.F., 1954 Seismicity of the earth and associated phenomena. -- Princeton Univ. Press, Princeton
- GUTENBERG, B., 1956 Neue Ergebnisse über den Aufbau der Erde. -- Geol. Rundsch. Bd. 45, S. 342
- HALLAM, A., 1973 A revolution in the earth sciences. From continental drift to plate tectonics. -- Oxford
- HESSE, R. et al., 1974 Walther's facies rule in pelagic realm -- a large scale example from the Mesozoic-Cenozoic Pacific. -- Zeitschr. Dtsch. Geol. Ges. Bd. 125, S. 151
- HILLEBRANDT, A. v., 1980 Paleozoogeografia de Jurásico marino (Lias hasta Oxfordiano) en Suramérica. -- Nuevos resultados de la Investigación geocientífica Alemana en Latinoamérica. (Herausgegeben von der Deutschen Forschungsgemeinschaft)
- HILLEBRANDT, A. v., 1981 Kontinentalverschiebung und die paläozoogeographischen Beziehungen des südamerikanischen Lias. -- Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 570
- HOLMES, A., 1931 Radioactivity and earth movements. -- Transact. Geolog. Soc. Glasgow, Bd. 18
- HOLMES, A., 1965 Principles of physical Geology. -- London
- IHERING, H. v., 1927 Die Geschichte des Atlantischen Ozeans. Jena
- ILLIES, H., 1970 Die großen Gräben: Harmonische Strukturen in einer disharmonisch struierten Erdkruste. -- Geol. Rundsch. Bd. 59, S. 528
- JOLY, J., 1925 The surface History of the Earth. -- Oxford
- JORDAN, P., 1966 Die Expansion der Erde. -- Braunschweig (Vieweg)
- KERNER-MARILAUN, F., 1930 Paläoklimatologie. Berlin
- KÖPPEN, W. & WEGENER, A., 1924 Die Klimate der geologischen Vorzeit. Berlin (Bornträger)

- KRAUS, E., 1936 Der Abbau der Gebirge. -- Berlin (Bornträger)
- KRAUS, E., 1951 Vergleichende Baugeschichte der Gebirge. -- Berlin (Akademie-Verlag)
- KRÖNER, A., 1981 Precambrian crustal evolution and continental drift. Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 412
- LE PICHON, X., FRANCHETEAU, J., BONNIN, J., 1973: Plate tectonics. Amsterdam
- Mc CONNELL, R.B., 1974 Evolution of taphrogenic lineaments in continental platforms. -- Geol. Rundsch. Bd. 63, S. 389
- MARTIN, H., 1981 The late Paleozoic Gondwana glaciation. -- Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 480
- MILLER, H., 1981 Paläozoische und frühmesozoische Orogenesen am pazifischen Rand Gondwanas. -- Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 519
- PILGER, A. & RÖSLER, A., 1976 The contemporaneous tectonic events of the Indian Ocean and neighbouring areas. -- Abh. Braunschweig. Wissensch. Ges. Bd. 26, S. 67
- RUNCORN, S.K., 1962 Towards a theory of continental drift. -- Nature, Bd. 193
- RUNCORN, S.K., 1962 Palaeomagnetic evidence for continental drift and its geophysical cause. -- Continental drift, Bd. 1. New York
- SCHMIDT-EFFING, R., 1979 Alter und Genese des Nicoya-Komplexes, einer ozeanischen Paläokruste (Oberjura bis Eocän) im südlichen Zentralamerika. -- Geol. Rundsch. Bd. 68, S. 457
- SCHÖNENBERG, R., 1975 Die Entstehung der Kontinente und Ozeane in heutiger Sicht. -- Darmstadt (Wissensch. Buchges.).
- SCHUCHERT, Ch., 1932 Gondwana Land bridges. -- Bull. Geol. Soc. America, Bd. 43, S. 875
- SCHWARZBACH, M., 1980 Alfred Wegener und die Drift der Kontinente. Stuttgart (Wissensch. Verlagsges.)
- SCHWINNER, R., 1920 Vulkanismus und Gebirgsbildung. -- Zeitschr. f. VulkanoI. Bd. 5, S. 175

- SEIBOLD, E., 1974 Der Meeresboden. Ergebnisse und Probleme der Meeresgeologie. Berlin (Springer Verlag)
- STAUB, R., 1928 Der Bewegungsmechanismus der Erde. -- Berlin (Bornträger Verlag)
- STILLE, H., 1924 Grundfragen der vergleichenden Tektonik. -- Berlin. Bornträger Verlag
- SUESS, E., 1885 1909 Das Antlitz der Erde. -- 3 Bände. Wien und Leipzig
- TAMRAZIAN, G.P., 1971 Siberian continental drift. -- Tectonophysics, Bd. 11, S. 433
- TOLLMANN, A., 1976 Plattentektonische Fragen in den Ostalpen und der plattentektonische Mechanismus des mediterranen Orogens. Mitt. Österreich. Geol. Ges. Bd. 69, S. 291
- UYEDA, S., 1981 Subduction zones and Back arc Basins -- A review. Geol. Rundsch. Bd. 70, S. 552
- WEGENER, A., 1912 Die Entstehung der Kontinente. -- Geol. Rundsch. Bd. 3, S. 276
- WEGENER, A., 1915 Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. -- Braunschweig (Vieweg Verlag) -- Weitere Auflagen 1920, 1922, 1929
- WUNDERLICH, H.G., 1973: Plattentektonik in kritischer Sicht. -- Zeitschr. Dtsch. Geol. Ges. Bd. 124, S. 309
- WUNDERLICH, H.G., 1975 Das neue Bild der Erde. -- Hamburg (Hoffmann und Campe Verlag)
- ZEIL, W., 1979 The Andes. A geological review. -- Stuttgart (Bornträger Verlag)

Anschrift des Verfassers:

Prof.Dr. Karl BEURLEN
Gartenstraße 137
7400 Tübingen

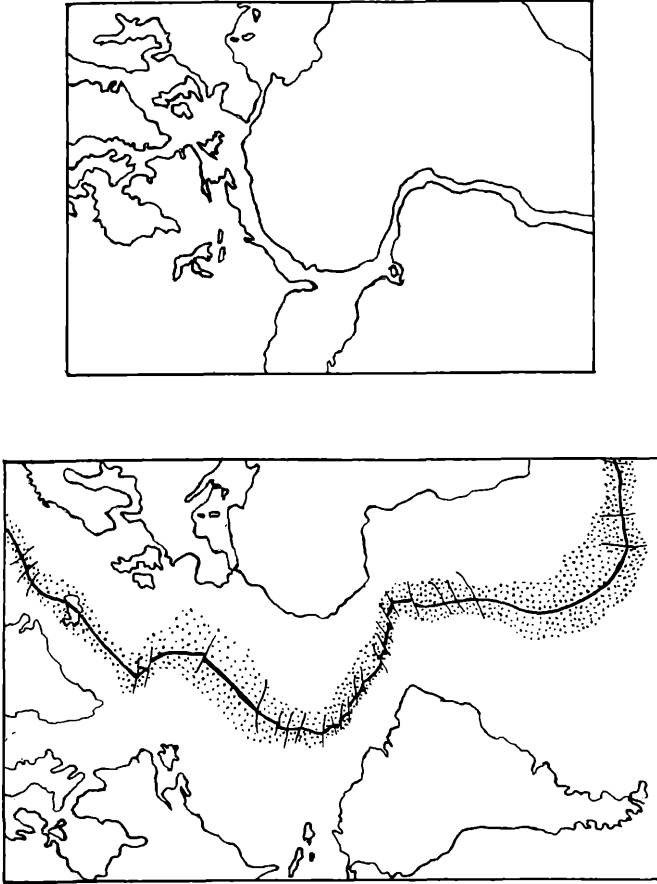


Abb. 1

Der Atlantische Ozean. -- Links: Heutiger Küsten-Verlauf mit seiner auffälligen Parallelität, die nur im mittelamerikanischen Abschnitt unterbrochen ist (vgl. dazu Entstehungsgeschichte des Atlantik -- S. 41 ff und Abb. 11 und 12). Atlantischer Mittelrücken (punktierte Fläche) mit seiner Zentralachse (kräftige Linie) und den Querstörungen, die in dem Mittelabschnitt besonders gehäuft auftreten. Auch das eine Folge der Entstehungsgeschichte (vgl. S. 41 ff). -- Rechts: Bei einem Zusammenrücken der beiden Amerikas und Europa/Afrikas wird die Küstenparallelität besonders deutlich, mit ihrer Unterbrechung im mittelamerikanischen Abschnitt.

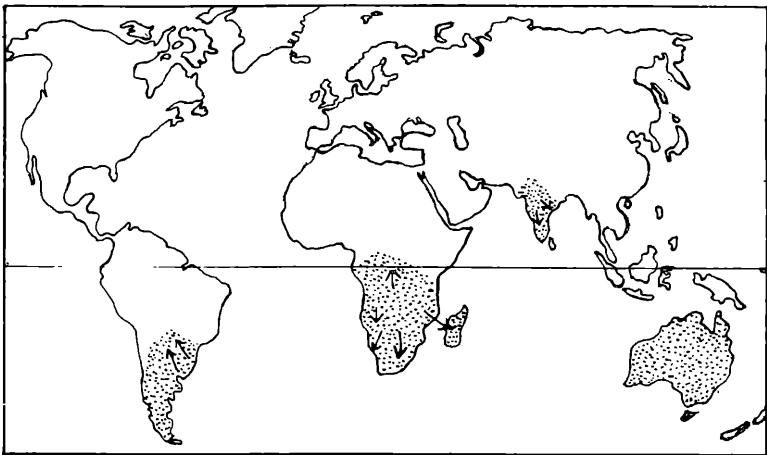


Abb. 2 Gondwana-Kontinent. -- Unten: Die heutige Lage der Gondwana-Restkontinente zwischen Süd-Atlantik und Indik. Punktierte Flächen: Verbreitungsgebiet der *Glossopteris* - Flora und der Moränenbildungen der Gondwana-Eiszeit. -- Oben: Bei einem Zusammenrücken der Gondwana-Teilkontinente um den Antarktischen Kontinent ergibt sich ein das Gondwana-Inlands eis verständlich machendes Bild.

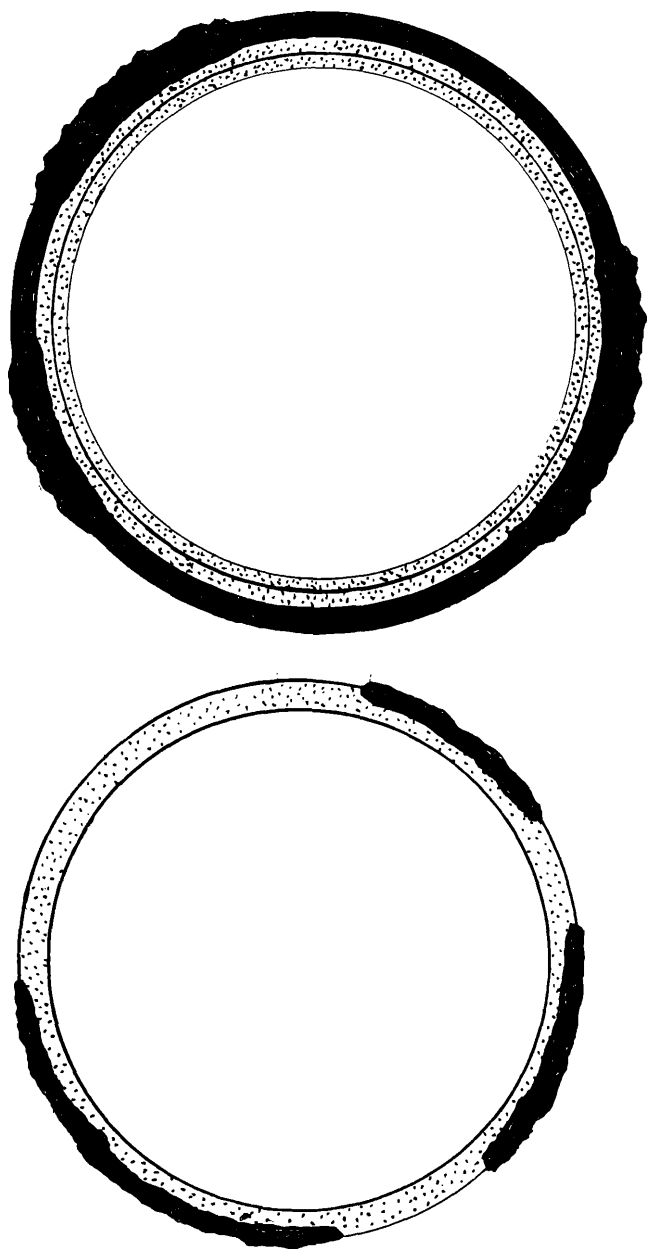


Abb. 3 Durchschnitt durch den Erdkörper, rechts nach den ursprünglichen Vorstellungen der Kontraktions-
theorie mit der ringsum geschlossenen Sial-Ober- und Sial-Unterkruste, links nach den Vorstel-
lungen von WEGENER mit isolierten Sialplatten, die in der Sima-Unterlage schwimmen.

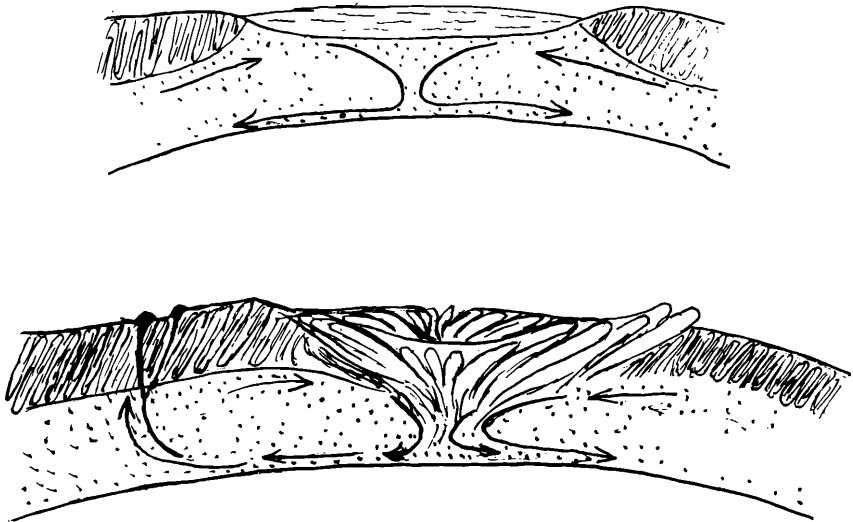


Abb. 4 Das von E. KRAUS entwickelte Schema der Verschluckungshypothese. Oben: Vor-orogene Phase (Geosynklinal-Entwicklung). Über der abströmenden Krusten-Unterlage senkt sich ein breiter Krustenstreifen ein. Unten: Orogene Phase (Tief-Orogenese). Mit dem weitergehenden subkrustalen Abströmen, werden die geosynklinalen Formationsfolgen entwurzelt und zwischen den sich zusammenschiebenden Kontinentalblöcken in Decken übereinander gestapelt. Beachte den subkrustalen Strömungskreislauf, der von E. KRAUS dem Geschehen unterstellt worden ist. Vgl. Abb. 9.

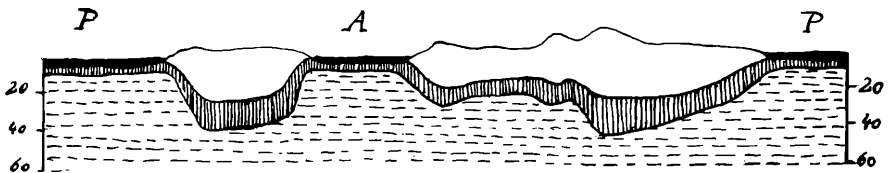


Abb. 5 Schematisch vereinfachter Schnitt durch die Erdkruste der Nord-Hemisphäre, wie er sich aus den Befunden der Erdbebenkunde ergibt.

Weiß: Die Sial-Oberkrusten-Platten von Amerika und Eurasia

Vertikal schraffiert: Ozeanische Kruste und simatische Unterkruste der Kontinente.

Horizontal gestrichelt: Oberer Erdmantel. P Pazifik. A Atlantik. Die seitlich eingesetzten Zahlen geben die Tiefe in Kilometer an.

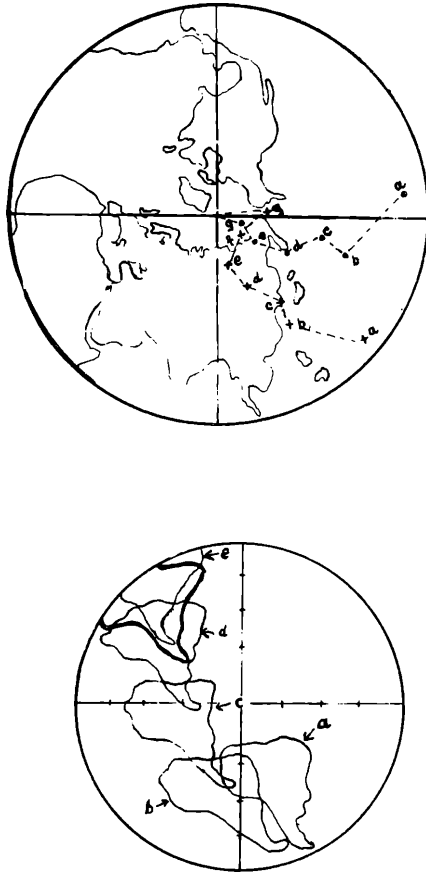


Abb. 6 Paläomagnetische Befunde:

Oben: Die Nord-Hemisphäre mit den um den Nordpol gruppierten Eurasia und Nordamerika. Die nach den paläomagnetischen Messungen festgestellten Lagen des Nordpols bei der Annahme, daß die Lage der Kontinente die gleiche ist wie heute. Die Nordpol-Lagen im Kambrium (a), Silur (b), Oberkarbon (c), Perm (d), Trias (e), Jura (f) und Kreide (g) sind für Nordamerika durch Kreuze und für Europa durch Punkte angegeben. Durch die ganze Erdgeschichte hindurch haben Nordamerika und Europa verschiedene Lagen zum Nordpol.

Unten: Die Lage Südamerikas zum Südpol unter der Voraussetzung, daß der Pol eine fixierte Lage hatte. Lage des Kontinentes im Kambrium (a), im Devon (b), im Oberkarbon (c), im Perm (d), im Jura (e). Mit dicker Linie markiert die heutige Lage Südamerikas.

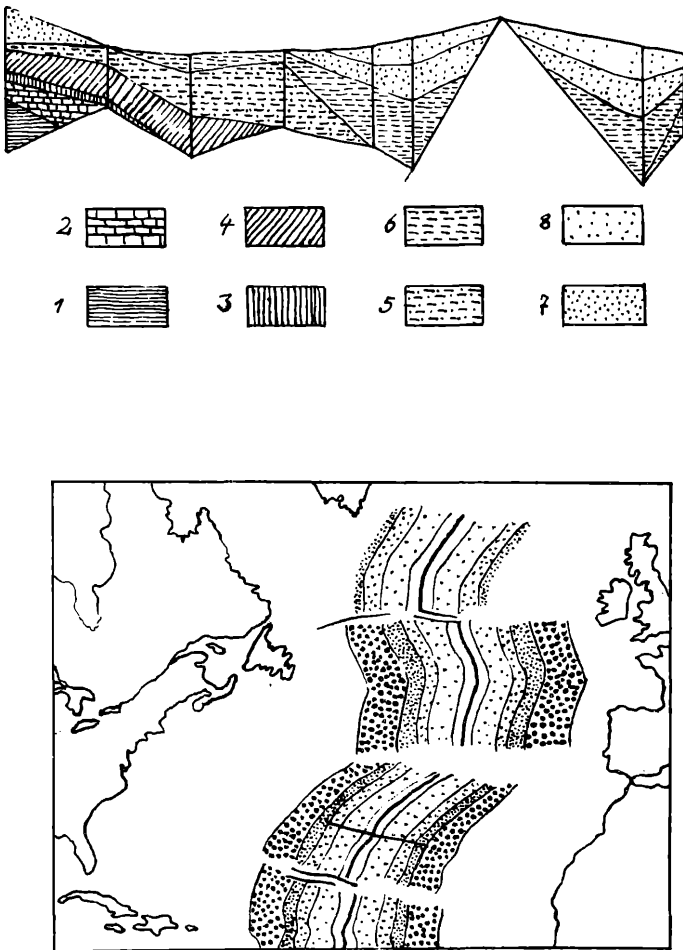


Abb. 7 Der Atlantische Mittelrücken.

Oben: Querprofil durch die Sedimentdecke über dem Mittelrücken im Süd-Atlantik auf Grund der Bohrergergebnisse. Die Lage der Bohrungen und Bohrprofile ist durch die Vertikal-Linien bezeichnet. -- 1 Campan, 2 Maastricht, 3 Paleocän, 4 Eocän, 5 Oligocän, 6 Miocän, 7 Pliocän, 8 Pleistocän.

Unten: Der Mittelrücken im Nord-Atlantik. Kräftige Linie: Mittelachse des Rückens mit der Grabenspalte. Die gleichaltrigen Streifen auf den Flanken seitlich der Mittelachse sind durch gleiche Signaturen gekennzeichnet.

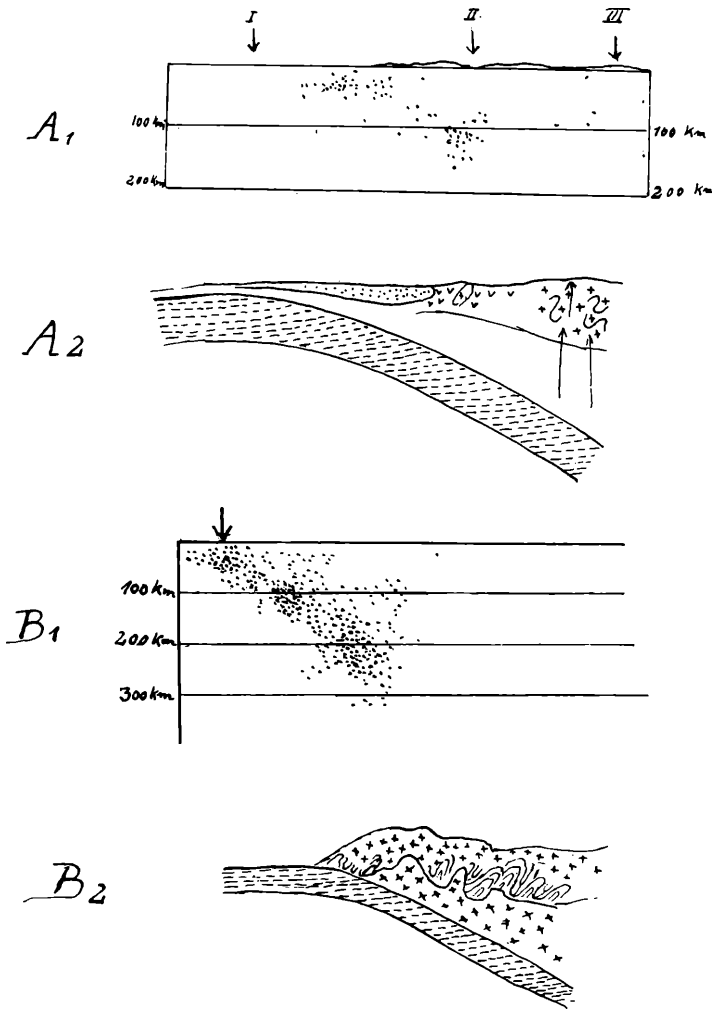


Abb. 8 Die Lage der Erdbebenherde am Andenrand Südamerikas, A in Kolumbien, B in Nord-Chile. In A₁ und B₁ zeigen die Punkte die Herdlage von registrierten und vermessenen Erdbeben. Bei A₁ bezeichnet Pfeil I die Küstenregion, Pfeil II die West-Cordillere, Pfeil III die Ost-Cordille, bei B₁ bezeichnet der Pfeil die Küstenlinie. -- A₂ und B₂ zeigen die aus diesem Verhalten der Erdbebenherde und ergänzenden Beobachtungen gezogene Folgerung -- Eintauchen der pazifischen ozeanischen Kruste unter die Kontinentalkruste.

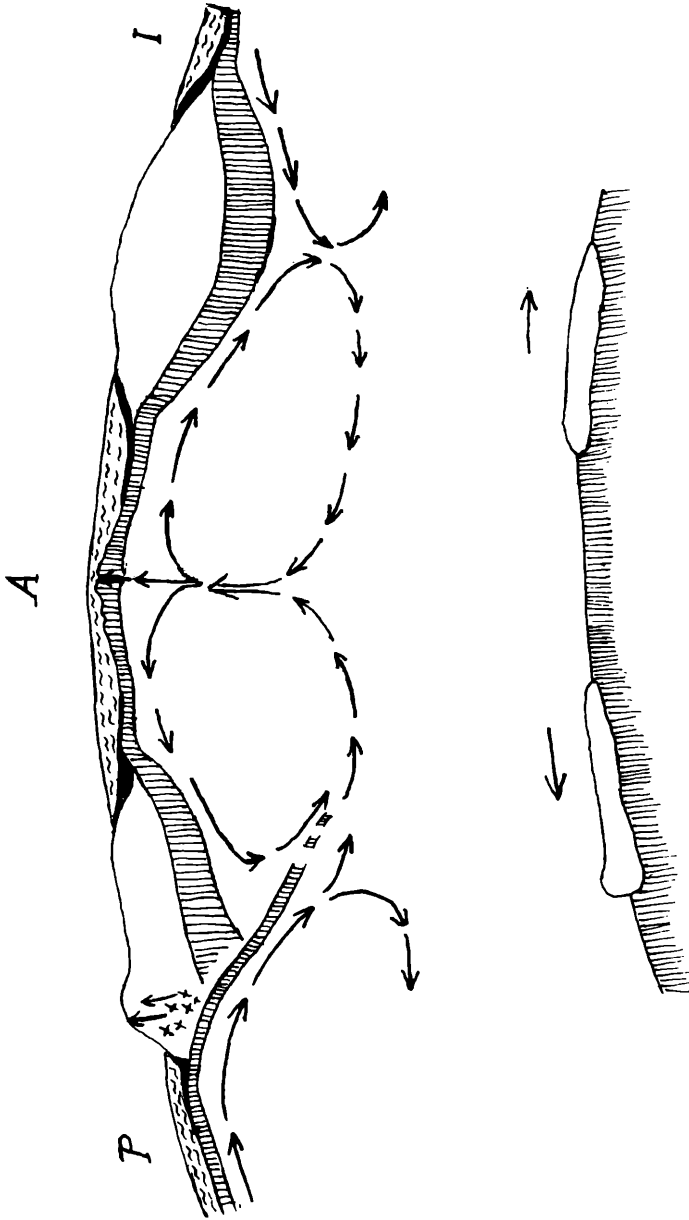


Abb. 9 Unten: Schema der ursprünglichen sehr einfachen Vorstellung von WEGENER. --
 Oben: Modell der Plattentektonik am Beispiel des Süd-Atlantik. P Pazifik, A Atlantik.
 Wellenlinien: Wasserfüllung der Ozeane. Schwarz: Junge ozeanische Sedimente nahe dem
 Kontinentalrand. Weiß: Kontinentale Sial-Tafeln. Vertikal schraffiert: Ozeankruste und
 kontinentale Unterkruste. Pfeile: Das angenommene subkrustale Strömungssystem im oberen
 Erdmantel.

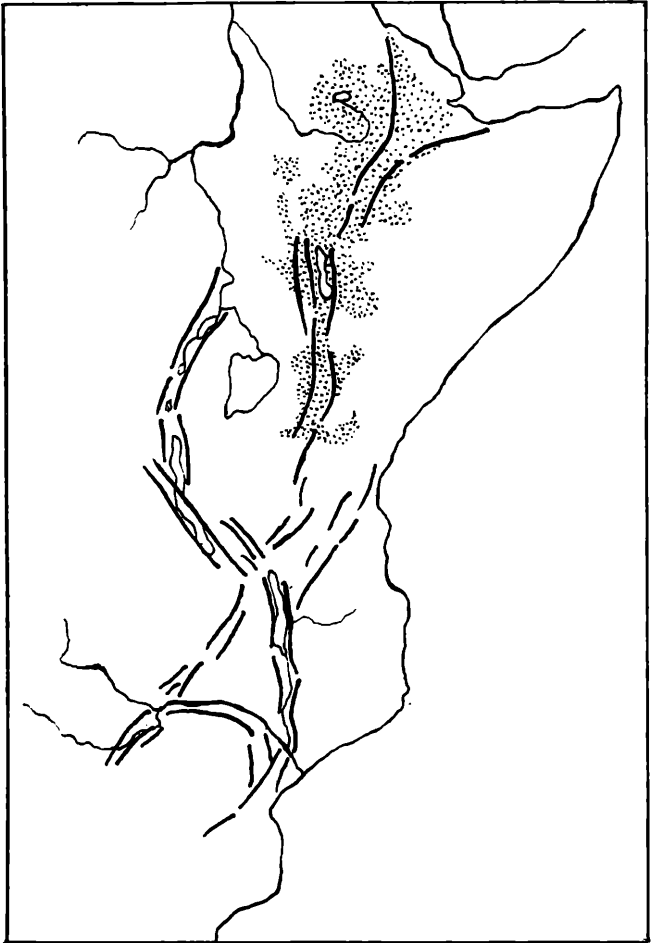


Abb. 10 Das ostafrikanische Grabensystem und die ihm zugeordneten Areale vulkanischer Ergüsse (punktierte Fläche). -- Nach Mc CONNELL.

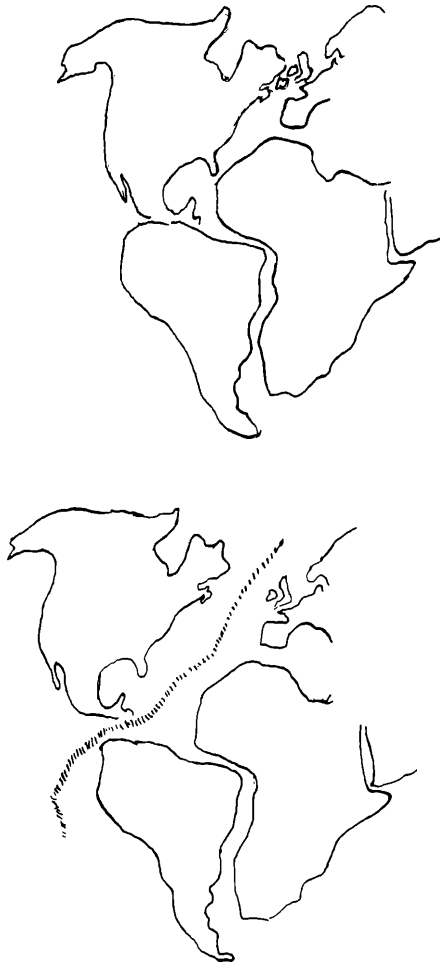


Abb. 11 Entwicklung des Atlantik I (Jura).
 Oben: Die im West-Abschnitt der Pangäa zusammengeschobenen Kontinente vor dem Aufreißen der nord-atlantischen Spalte.
 Unten: Aufreißen der nord-atlantischen Spalte im Jura und Bildung des über den mittelamerikanischen Raum in den Pazifik hinausreichenden nord-atlantischen Mittellückens. Dadurch wird auch Nord- und Süd-Amerika auseinandergeschoben, wodurch der Raum für den späteren Pana-Isthmus entsteht.

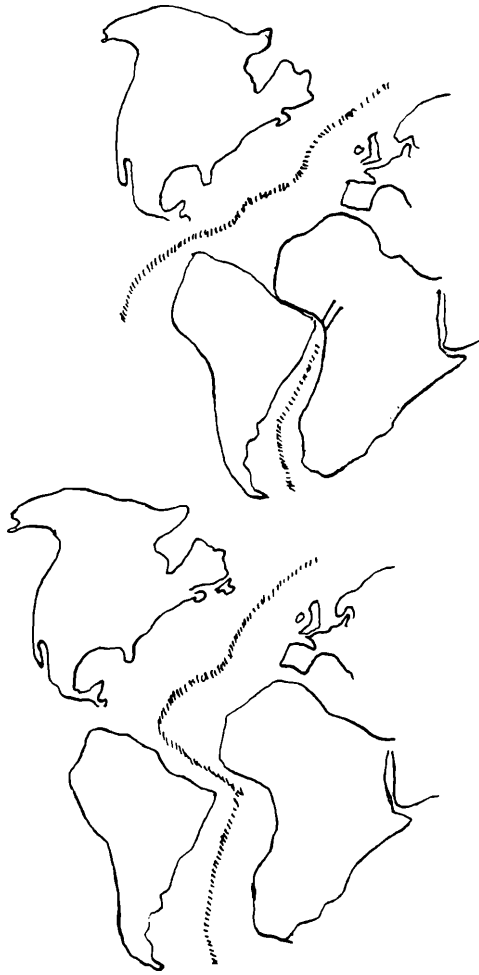


Abb. 12 Entwicklung des Atlantik II (Kreide). --
 Oben: Zunehmende Verbreiterung des Nord-Atlantik. Aufreißen der Süd-Atlantik-Spalte, die sich in den Benue-Graben in Kamerun fortsetzt. (Unterkreide).
 Unten: Oberkreide. Aufreißen der Süd- und Nord-Atlantik verbindenden Süd-Amerika und Afrika endgültig trennenden mittelatlantischen Querspalte, in die sich der süd-atlantische Mittelrücken hinein weiterbildet (mittel-atlantischer Abschnitt mit der Häufung von Querstörungen im Mittelrücken, vgl. Abb. 1). Die ursprüngliche Fortsetzung des nord-atlantischen Mittelrückens in den Pazifik wird dadurch abgerissen. Deren Fragmente sind im Nicoya-Komplex des Panama-Isthmus herausgeschoben.