©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Schriften Verein zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse **148–150** (2012): 75–100

100 Jahre Kontinentalverschiebungstheorie Von der Hypothese A. Wegener's zur Realität der Plattentektonik. Ein wissenschaftshistorischer Bericht

Erich Thenius

Kurze historische Übersicht über die Entstehung und Begründung der Arbeitshypothese von Alfred Wegener über die Kontinentalverschiebung im Jahr 1912. Nach jahrzehntelanger Ablehnung der Vorstellungen Wegener's durch Geologen und Geophysiker setzte in den späten 50-er Jahren durch neue Erkenntnisse der Geophysik über den Paläomagnetismus (die zeigten, dass die Lage der Kontinente im Laufe der Erdgeschichte veränderlich war), ein Umschwung ein. Weitere Befunde aus der Geophysik (wiederholte Umpolungen des erdmagnetischen Feldes) und der Meeresgeologie führten zum sog. „sea-floor spreading"-Konzept (Meeresbodenverbreiterung) durch H. H. Hess und R. S. Dietz 1961 und schließlich zum „plate tectonics"-Konzept in den Jahren 1967/68. Dieses neue Konzept führte zu einer Revolution in den Erdwissenschaften. Es beruht auf der Erkenntnis, dass die Erdkruste (Lithosphäre) aus etlichen beweglichen Platten besteht, die durch schweren Ozeanboden bzw. leichteren Kontinentalplatten gebildet werden. Letztere werden bei Entstehung von neuen Meeresböden durch magmatische Konvektionsströmungen im Erdmantel (Asthenosphäre) verlagert, womit die Kontinentalverschiebungstheorie Wegener's im Prinzip bestätigt wurde. A. Wegener konnte seinen Triumph leider nicht mehr erleben. Er starb bekanntlich während seiner letzten Grönlandexpedition im Jahr 1930.
Das relativ einfache Konzept der Plattentektonik hat für die Erd- und Biowissenschaften große Bedeutung, welches an Hand einzelner konkreter Beispiele dargestellt wird (von Gebirgsbildungen, Vulkanismus, Erdbeben, Erzprovinzen, der Petrogenese und Metamorphose von Gesteinen bis zu einstigen Meeresströmungen, Meeresspiegelschwankungen sowie zur Entstehung kryogener Perioden bzw. zur Erklärung disjunkter Verbreitungsbilder in der Biogeographie).

Thenius E., 2012: 100 years Continental drift theory. From the hypothesis of A. Wegener to the reality of the plate tectonics. A history of science report.
A short synopsis of the historical development of the "sea-floor spreading"- and the "plate tectonics"-concept is given. In an introduction the paper provides a brief resumé of the development of the "Kontinentalverschiebungshypothese" of Alfred Wegener since the year 1912. In the following chapters the importance and the implications of these concepts for the Earth sciences and for the Biosciences are demonstrated. This is discussed in the framework of many examples from geophysics, petrology, geology and palaeontology to physical geography (e.g. volcanism, rock metamorphism, mountain building, hydrothermal mineral deposits, palaeoclimatology [kryogene periods, ocean currents etc.], palaeobiogeography [*Glossopteris*-flora etc.]) and biogeography (disjunct areas of limnic organisms[e.g. lungfishes] and land mammals [e.g. marsupials] as well as plants (e.g. *Nothofagus*].

Keywords: Alfred Wegener, "continental drift", "sea-floor spreading", "plate tectonics", pangaea, gondwana, palaeomagnetism, mountain building, volcanism, palaeobiogeography.

Alfred Wegener's Vorstellungen

Am 6. Jänner 1912 stellte der Meteorologe und Polarforscher Alfred Wegener (1880–1930) aus Marburg/L. erstmals seine Hypothese von einer Drift der Kontinente im Lauf der Erdgeschichte an Stelle der alten Hypothese der versunkenen Kontinente in einem Vortrag anlässlich der Jahreshauptversammlung der Geologischen Vereinigung im Senckenberg-Museum in Frankfurt/M. der Öffentlichkeit vor (Wegener 1912a). Der Vortrag

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

trug den Titel „Die Herausforderung der Großformen der Erdrinde (Kontinente und Ozeane), auf geophysikalischer Grundlage“.

Allerdings stießen seine Vorstellungen über eine Drift der Kontinente in einer Zeit, in der man die Permanenz der Ozeane annahm, auf Widerstand von Seiten der führenden Geologen, nicht nur deshalb, weil WEGENER kein Geologe, sondern ein Meteorologe und Polarforscher war. Herrschte doch damals die Kontraktionstheorie der Erde in der Geologie und die Konstanz von Ozeanen und Kontinenten vor. Die bereits damals bekannten geologischen und paläontologischen Ähnlichkeiten und Übereinstimmungen verschiedener Kontinente wurden durch einstige Landbrücken (z. B. Lemuria als indomadagassische Halbinsel und Archhelenis als brasiloafrikanischer Kontinent) erklärt.

An der allgemeinen Ablehnung der Kontinentverschiebungstheorie änderte sich auch nichts als WEGENER seine Vorstellungen in einer ausführlichen Publikation (1915) und den folgenden Auflagen (1920, 1922 und 1929) ausführlich begründete. Abgesehen von wenigen Ausnahmen unter den Geowissenschaftern wie etwa DU TOIT (1937), dauerte es bis in die frühen 60er Jahre bis es zu einem **allgemeinen** Umschwung durch neue Erkenntnisse und damit im Prinzip zur Anerkennung der Kontinentalverschiebungstheorie kommen sollte.

WEGENER war zwar keineswegs der erste, der eine „Drift“ der Kontinente und damit den Mobilismus im Gegensatz zum sog. Fixismus annahm, er untermauerte seine ausführlichen Vorstellungen jedoch durch Befunde aus der Geographie, Ozeanographie, Paläoklimatologie und der Biogeographie. Abgesehen von der Kongruenz des Küstenlinienverlaufes, der bereits von Francis BACON im Jahre 1620, vom französischen Mönch François Placet (1660), vom deutschen Theologen Theodor LILIENTHAL, 1756, und von Antonio SNIDER-PELLEGRINI, 1858, erkannt wurde, bzw. des Kontinentalsockels von Südamerika und Afrika und der Übereinstimmungen des geologischen Baues (gleiche Gesteinsabfolge, tektonischer Bau etc.) diesseits und jenseits des Atlantischen Ozeans, waren es bereits damals Ergebnisse der Geophysik, die seine Vorstellungen wesentlich beeinflussten.

Wie eine hypsographische (hypsometrische) Kurve der Erdoberfläche erkennen lässt, sind zwei mittlere Höhen (nach WEGENER 840 Meter auf den Kontinenten und 4300 Meter unter dem Meeresspiegel) aufgrund topographischer Gegebenheiten und von bereits damals (1912) bekannten Schweremessungen zu unterscheiden, indem kontinentale (Sial) und ozeanische (= Ozeanboden oder Sima) Erdkruste, d. h. die Lithosphäre unterschiedliche Dichte aufweisen. WEGENER verglich dabei die leichteren Kontinente mit driftenden Eisschollen im Wasser. Bemerkenswert ist, dass WEGENER in seinen beiden ersten Veröffentlichungen auf die Bedeutung des mittelatlantischen Rückens hinweist, diese jedoch später nicht mehr auswertet. In den Petermanns Mitteilungen (1912) schreibt er: „Diese [Niveauunterschiede der großen ozeanischen Becken] scheinen es auch nahezulegen, die mittelatlantische Bodenschwelle als divergierende Zone zu betrachten, in welcher bei der noch immer fortschreitenden Erweiterung des Atlantischen Ozeans der Boden desselben fortwährend aufreißt und frischem, relativ flüssigen und hoch temperiertem Sima aus der Tiefe Platz macht“. In seinen späteren Publikationen ist jedoch davon nicht mehr konkret die Rede. Lediglich in Verbindung mit der Erwähnung von Konvektionsströmungen im Sinne von FISHER (1881), AMPFERER (1906) und SCHWINNER (1920) werden diese als gute Erklärung für die Öffnung des Atlantischen Ozeans angeboten, allerdings müsste sich erst die theoretische Grundlage dieser Vorstellung als tragfähig erweisen (WEGENER 1929). Die von HOLMES (1931) für den ganzen Erdmantel angenommenen Konvektionsströmungen in Zusammenhang mit der Radioaktivität wurden erst

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

nach dem Tod von Wegener publiziert. Damit ist ersichtlich, dass der Atlantische Ozean und seine Entstehung eine wesentliche Rolle für Wegener spielte. Sie waren auch der Anlass für die von ihm ausdrücklich als Arbeitshypothese vorgebrachten Vorstellungen zur Kontinentverschiebung.

So wurden 1912 die bereits damals bekannten geologischen und paläontologischen Ähnlichkeiten und Übereinstimmungen verschiedener Kontinente durch einstige Landbrücken, die abgesunken seien, erklärt. Eine Annahme, die Wegener als Geophysiker als unzutreffend erkannte.

Anlass für seine von ihm – wie bereits erwähnt – ausdrücklich als Arbeitshypothese bezeichneten Vorstellungen waren im Jahr 1911 der neue Andree'sche Weltatlas (8. Auflage, Wien 1909), wo ihm an einer Meereskarte des Atlantiks die Übereinstimmung der Küstenlinien von Südamerika und Afrika auffiel, sowie ein Referat von Arldt in der Naturwissenschaftlichen Rundschau (1910) über eine Publikation von R. F. Scharff „On the evidence of a former landbridge between Northern Europe und North America" aus dem Jahr 1909. Diese beruhte auf biogeographischen Befunden aus der rezenten, also gegenwärtigen Tier- und Pflanzenwelt, aufgrund derer Scharff eine noch bis in die quartärzeitliche Eiszeit anhaltende Landverbindung zwischen Nordeuropa und Nordamerika annahm.

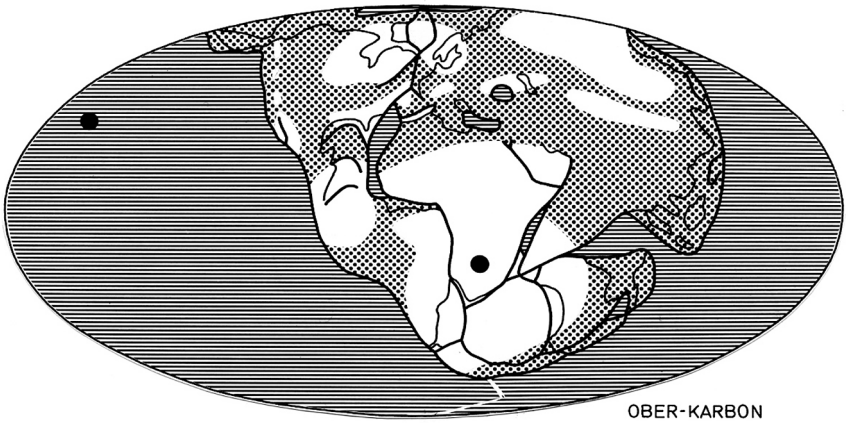
Wegener weist in seiner ersten Publikation (1912a) auch auf Pickering (1907) und Taylor (1910) hin, betont jedoch, dass er seine Vorstellungen unabhängig von jener Taylor's entwickelt habe. Taylor ging bei seinen durch Eduard Suess „Das Antlitz der Erde" (1909) angeregten Überlegungen von den großen tertiärzeitlichen Gebirgsfaltensystemen in der Erdkruste aus, die er mit Horizontalverschiebungen der Kontinente, die durch die Gezeiten erzeugende Kraft des Mondes bedingt seien, im Zusammenhang bringt.

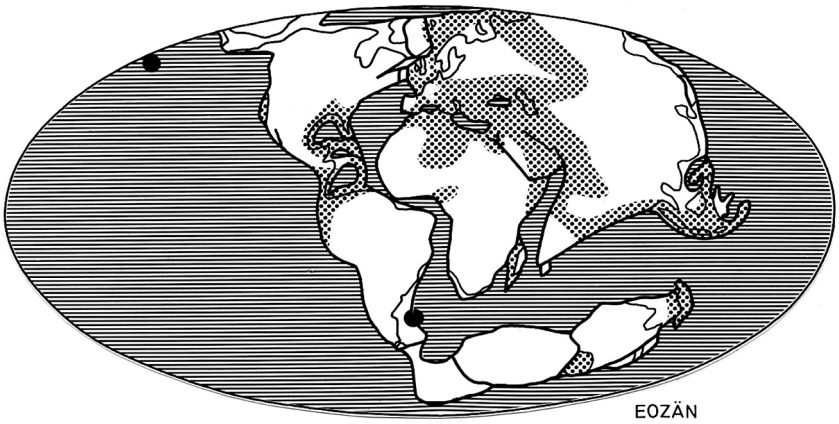
Abgesehen von den Fakten die den Atlantischen Ozean betreffen, waren es auch paläobiogeographische Befunde, die durch eine Verschiebung der heutigen Kontinente erklärt werden konnten. So ist die gegenwärtig disjunkte Verbreitung der permischen *Glossopteris*-Flora (benannt nach der Gattung *Glossopteris*, einem Farnsamer („Pteridospermae") in Südamerika, Afrika, Vorderindien, Antarktis und Australien; (s. Plumstead 1973) bei Annahme eines einheitlichen Südkontinentes (Gondwana-Kontinent, nach Suess 1885), der Südamerika, Afrika mit der Arabischen Halbinsel, Madagaskar, Vorderindien, Australien und die Antarktis umfasste, ohne Schwierigkeiten zu erklären (vgl. Abb. 8).

Das gleiche gilt für die damalige Vereisung, die aus weiten Teilen der Südhemisphäre ihre Spuren in Form von Gletscherschliffen, Moränen (Tillite) und geschrammten Geschieben hinterlassen hat. Diese Gletscherspuren lassen sich zwanglos durch einen einst einheitlichen Südkontinent (Gondwana) erklären. Nur war Gondwana kein Brückenkontinent wie er von Suess (1885) angenommen worden war. Australien wurde allerdings von Suess nie erwähnt.

Gemäß aller dieser Befunde, auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden kann, erstellte Wegener sein Konzept, das er im Laufe der Jahre ergänzte, jedoch im Prinzip beibehielt. Ausgehend von der Pangaea (Wegener 1920) im Jung-Paläozoikum, die meist fälschlich als Ur-Kontinent bezeichnet wird, kam es zu einem Zerfall der Kontinentkruste unter Bildung des heutigen Atlantischen, des Indischen und des Arktischen Ozeans. Der Zeitplan sah nach Wegener derart aus, dass sich der Atlantik vom Süden her zur Kreidezeit zu bilden begann, jedoch noch im Eozän Südamerikas über die Antarktis mit Australien landfest verbunden war (Abb. 1). Die Abtrennung Vorderindiens von

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at





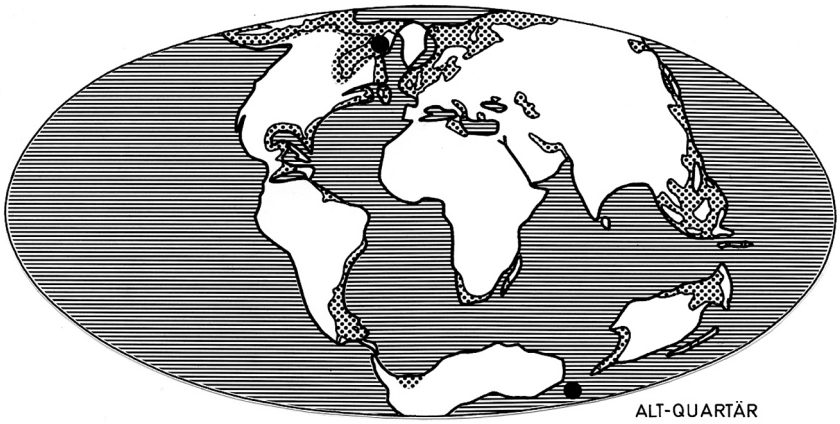


Abb.1: Lage und Ausbildung der Kontinente, ausgehend von der Pangaea im Ober-Karbon, Eozän und Alt-Quartär nach A. WEGENER (1929). Schraffiert = Ozeane; punktiert = Flachsee; Punkte = Nord- bzw. Südpol. – Fig. 1: Situation and formation of the continents starting out from Pangaea in the Late-Carboniferous, Eocene and old Quaternary after A. WEGENER (1929). Hatch = oceans; dotted = Shallow sea; points = the North or South Pole.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Australien wäre bereits zur älteren Jura-Zeit, jene von Madagaskar hingegen erst an der Kreide-Tertiärgrenze erfolgt. Nach WEGENER war Vorderindien ursprünglich durch ein langes, meist von einem Flachmeer bedecktes Schollenstück mit dem asiatischen Kontinent verbunden. Erst durch die fortschreitende Annäherung des heutigen Vorderindiens an Asien wurde dieses immer mehr zusammengedrückt und zum Himalaya aufgefaltet. Nordamerika bildete mit Grönland und Europa eine zusammenhängende Scholle, die erst im Spättertiär, im Norden sogar erst im Quartär durch eine bei Grönland sich gabelnde Spalte zerrissen sein sollte. Der Skandik bildete den jüngsten Teil der atlantischen Spalte (vgl. SUESS 1938).

So faszinierend WEGENER's Vorstellungen auch waren, wurde seine Kontinentalverschiebungstheorie von den Geophysikern vor allem wegen der von ihm angenommenen Ursachen abgelehnt (1922 Tagung der „British Association of Advancement of Science" in Hull; 1926 WEGENER-Symposium in New York, 1939 Atlantis-Tagung in Frankfurt/M.).

WEGENER nahm vor allem auf Grund der Untersuchungsergebnisse EÖTVÖS als einzige Ursache der Verschiebungen die Polflucht-Kraft an, die bestrebt ist, Kontinentschollen äquatorwärts zu treiben (vgl. auch KÖPPEN 1922). WEGENER weist weiters darauf hin, dass für die Westwanderung der Kontinente verschiedene Autoren die Reibung der Gezeitenwellen in Anspruch genommen haben, die durch die Sonnen- und Mondanziehung im festen Erdkörper erzeugt werde. Nach WEGENER sei jedoch die Deformation der Erdfigur durch Polwanderungen als Kraftquelle völlig ausreichend, um die Wanderung der Kontinente und die damit verbundenen Faltungen bei Gebirgsbildungen zu erklären.

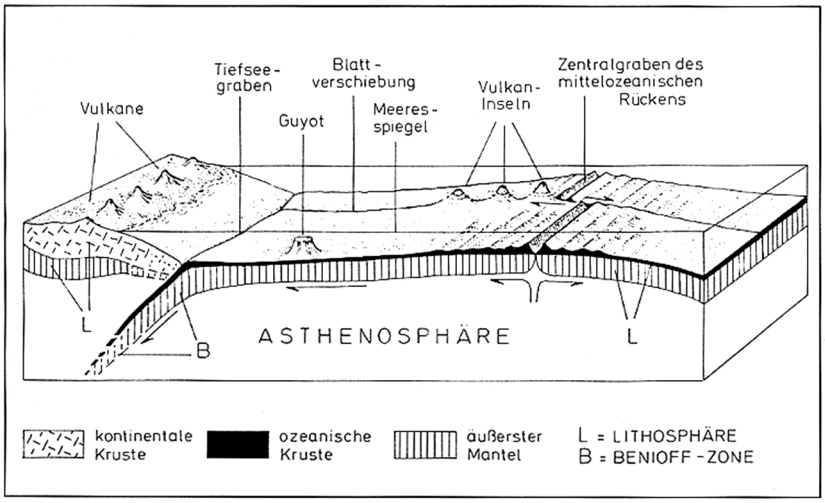


Abb. 2: Schema zum „sea-floor spreading"-Konzept. Ozeanboden mit einem von einer Blattverschiebung („transform fault") versetzten mittelozeanischen Rücken samt Zentralgraben („rift valley") sowie mit vulkanischen Inseln. Absinken (Subduktion) der ozeanischen Platte an einer Wadati-Benioff-Zone (B) unter Bildung eines Tiefseegrabens. Guyot = abgesunkene Vulkaninsel, die einst im Meeresspiegelniveau lag. Pfeile = Aufdringen von Magma im Erdmantel (Asthenosphäre) bzw. Bewegungsrichtung der Lithosphäre (L), die im Subduktionsbereich zur Auffaltung der Kontinentalplatte samt Vulkanismus vom pazifischen Typ geführt hat. Asthenosphäre = Zone des Erdmantels unterhalb der Lithosphäre (Erdkruste). Beachte mit Entfernung zum Rücken zunehmende Tiefe. (nach THENIUS 1977). – Fig. 2: Scheme of the "sea-floor spreading" strategy (after THENIUS 1977).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Wie bereits oben angedeutet begann erst in den 60er Jahren ein allgemeines Umdenken einzusetzen, nachdem die Vorstellungen der österreichischen Geowissenschafter AMPFERER (1941) und SCHWINNER (1942) über die Entstehung des Atlantik und des Pazifik in der Fachwelt unbemerkt beblieben waren (vgl. THENIUS 1980, 1988). AMPFERER nahm in seiner Publikation (ohne Kenntnis der Arbeiten von Holmes über Konvektionsströmungen jenes Konzept vorweg, das erst etwa 20 Jahre später durch den US-Ozeanographen H. HESS als „sea-floor spreading"-Konzept in die Wissenschaft eingeführt werden sollte (s. DIETZ 1961) (Abb. 2).

Neuere Erkenntnisse durch Geophysik und Meeresgeologie

Anlass zu diesem Umschwung war der Paläonmagnetismus und damit die Geophysik in Verbindung mit der Maringeologie. Messungen des unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. keine nachträgliche tektonische Verstellung der Gesteine; keine Erwärmung über den Curie-Punkt) in Gesteinen fossil erhaltenen remanenten (= fossilen) Erdmagnetismus an gleichaltrigen Gesteinen verschiedener Kontinente ergaben Werte, die weder mit der heutigen Position der Kontinente noch mit einer konstanten Lage der Kontinente zueinander während des Phanerozoikums in Einklang zu bringen waren (BLACKETT & al. 1965, RUNCORN 1956). D. h., die Lage der Kontinente war im Lauf der Erdgeschichte keineswegs konstant. Außerdem konnten durch weitere paläomagnetische Befunde reine Polwanderungen als mögliche Erklärung ausgeschlossen werden. Zu diesen auf dem Festland gewonnenen Befunden kamen dann die Ergebnisse ozeanographischer Untersuchungen durch Tiefseebohrungen, wie sie besonders seit 1968 im Rahmen des damaligen Joides-Tiefseebohrungsprogrammes (= **J**oint **O**ceanographic **I**nstitutions for **D**eep **E**arth **S**ampling) durch das US-Forschungsschiff „Glomar Challenger" planmäßig in allen Weltmeeren durchgeführt wurden. (Abb. 3). 1985 wurde die modernere „Joides Resolution" im Rahmen des Ocean Drilling Program (ODP)in den Dienst gestellt, im Jahr 2005 folgte dann das neue Forschungsschiff „Chikyu" für Tiefseebohrungen in Nagasaki (Japan), das Bohrungen bis in eine Tiefe von 7000 Metern durchführen kann (vgl. auch BEIERSDORF 1992 und SEIBOLD & THIEDE 1997). Die wichtigsten Erkenntnisse dieser geophysikalischen, geologischen und mikropaläontologischen Untersuchungen sind der Nachweis „mittel"ozeanischer Rücken, wie er bisher dahin nur vom Atlantik bekannt war, in sämtlichen Ozeanen und das von den jeweiligen Rücken küstenwärts zunehmende Alter des basaltischen Ozeanbodens. Diese submarinen Rücken sind von einem zentralen Graben, dem „rift valley", getrennt. In dessen Bereich kommt es zum Aufdringen von vulkanischen Lavamassen („pillow lavas") und damit zu einer ständigen Verbreiterung des Meeresbodens („sea-floor spreading"). Durch den Paläomagnetismus und die wiederholten Umpolungen des magnetischen Erdfeldes konnte in Verbindung mit der mikropaläontologischen Altersdatierung der Sedimente über dem basaltischen Ozeanboden der Nachweis geführt werden, dass der derzeit älteste Meeresboden aus der Jurazeit stammt. Es waren die Geophysiker VINE & MATTHEWS aus Cambridge, die im Jahr 1963 die Hypothese der wiederholten Umpolungen des erdmagnetischen Feldes während der Erdgeschichte entwickelten (Abb. 4). Anlass dazu waren die zweiseitig vom „rift valley" der Ozeanböden angeordneten Streifenmuster des Erdmagnetismus. Sie wurden durch das „sea-floor spreading" (s. u.) bestätigt. Damit war das Phänomen der wiederholten Umpolungen des erdmagnetischen Feldes als weltweite Erscheinung anerkannt, nachdem zunächst Umpolungen von Geophysikern vehement abgelehnt worden waren. So wurden Umpolungen bereits im beginnenden 20. Jahrhundert lokal registriert aber nicht anerkannt.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

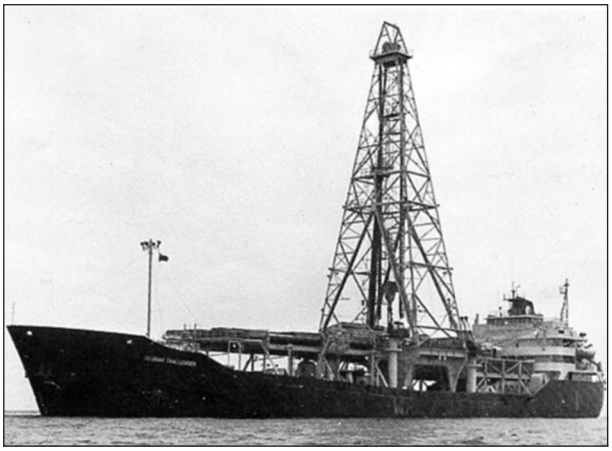


Abb.3: Das US-Tiefseebohrschiff „Glomar-Challenger", von dem aus von 1968 bis 1984 in sämtlichen Weltmeeren Tiefseebohrungen durchgeführt wurden. (nach Seibold 1974). – Fig. 3: The U.S. deep sea drilling ship "Glomar Challenger" which carried out deep sea drilling in all oceans from 1968 to 1984 (after Seibold 1974).

Zu diesen Befunden kommen jene der Seismologie über die Bebenherde und ihre Verteilung auf der Erdoberfläche. Diese treten nicht nur im Bereich der heutigen Faltengebirge, die im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung entstanden (z. B. Alpen, Zagros, Himalaya, Rocky Mountains und Anden) gehäuft auf, sondern vor allem an den Inselbögen in den Ozeanen (z. B. Sunda-Inseln, japanische Inseln, Alëuten, Kleine Antillen) und Tiefseegräben (z. B. Peru-Atacama-Graben) (= Tiefsee**furchen** nach Zöller & Hambach 2009) (Abb. 5). Im Bereich letzterer lassen sich die Tiefseebebenherde in schrägen „Ebenen"

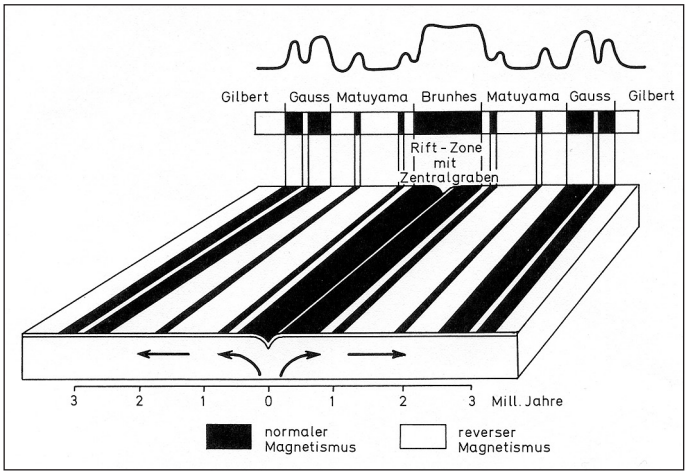


Abb. 4: Magnetisches, zweiseitig angeordnetes Streifenmuster im Bereich eines mittelozeanischen Rückens (mit Zentralgraben), das durch wiederholte Umpolungen des erdmagnetischen Feldes bei gleichzeitiger Meeresbodenverbreiterung entstanden ist (Schema). Brunhes, Matuyama, Gauss und Gilbert = Namen der erdgeschichtlich jüngsten geomagnetischen Epochen (s. Zahlenskala). Pfeile = Bewegungsrichtung des Magmas, welches den (basaltischen) Untergrund („basement") des Ozeanbodens bildet, der im Zuge der Abkühlung nach dem jeweiligen Magnetfeld magnetisiert wird. Oben: Magnetisierungskurve mit normalen (Brunhes, Gauss) bzw. reversem Magnetismus. (nach Thenius 1977). – Fig. 4: Stripe pattern in the area of a mid-oceanic ridge (with central trench) which is magnetic and ordered on two sides; this has arisen from repeated polar reversals of the geomagnetic field along with simultaneous seabed widening (scheme) (after Thenius 1977).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

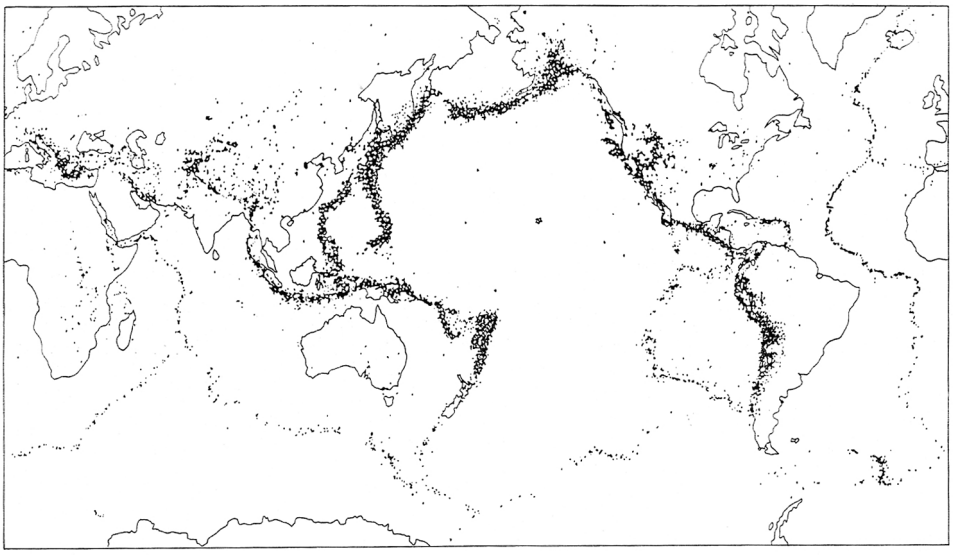


Abb.5: Weltkarte der Bebenherde (Epizentren). Beachte Häufung im Bereich der alpidischen Gebirgssysteme und der mittelozeanischen Rücken. bzw. Subduktionszonen (nach THENIUS 1977). – Fig. 5: Map of the world of the earthquake epicenters. Note the accumulation in the area of the alpin mountain systems and the mid-oceanic ridges or subductionzones. Old Precambrian continental shields are earthquake free (after THENIUS 1977).

(sog. Benioff-Zonen) bis in eine Tiefe von etwa 700 km verfolgen. Diese Erkenntnisse führten zur Vorstellung, dass in diesem Bereich die (dichteren) Ozeanplatten in den plastischen Erdmantel (Asthenosphäre) absinken (sog. Subduktion) und in weiterer Tiefe schließlich wieder aufgeschmolzen werden. Dies bedeutet, dass es nicht nur zu einer Neubildung von Ozeanboden kommt, sondern auch ständig zu seinem Verschwinden, was zwangsläufig eine Expansion der Erde ausschließt. Zugleich wurde auch verständlich, warum es gegenwärtig keinen Ozeanboden gibt, der älter als jurazeitlich ist. Ältere Ozeanbodenanteile sind durch die Subduktion nicht mehr erhalten geblieben. Das Alter der Ozeanböden ist durch biostratigraphische (nach Mikrofossilien) und radiometrische Datierung mit maximal 150 Millionen Jahren bestimmbar (SEIBOLD & THIEDE 1997).

Dazu kam der Nachweis von sog. „transform faults“ als eine Art von Blattverschiebungen im Bereich der „rift“-Zone der mittelozeanischen Rücken durch WILSON im Jahr 1965.

„sea-floor spreading-“ und „plate tectonics“-Konzept

Dieses „sea-floor spreading“-Konzept bedeutet zugleich eine „Drift“ der Kontinente, allerdings nicht im Sinne von WEGENER, indem die „Drift“ nicht durch die (leichteren) Kontinentalschollen erfolgte, sondern die Kontinente durch die neu entstehenden Ozeanschollen verschoben bzw. durch die absinkenden Ozeanböden gezerrt wurden, wie Zerrspalten im Subduktionsbereich vermuten lassen.

Das „sea-floor spreading“-Konzept führte schließlich in den Jahren 1967/68 zum „plate tectonics“-Konzept durch MCKENZIE und PARKER von Cambridge (1967) sowie MORGAN

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

von der Princeton University (1968), nachdem bereits Wilson, Toronto, im Jahr 1965 als erster den Begriff „plates" im heutigen Sinne gebrauchte.

Das Plattentektonik-Konzept besagt, dass die Erdkruste (Lithosphäre) aus mehreren Platten besteht, die sowohl Kontinente als auch Ozeanböden umfassen können, welche wiederum durch gegenseitiges Verschieben zu Gebirgsbildungen, zu Vulkanismus und zur Entstehung von vulkanischen Inselbögen führen. Wichtig erscheint, dass nur ozeanische Platten in den Erdmantel absinken, nicht jedoch ganze Kontinentplatten.

Das Plattentektonik-Konzept bedeutete für die heutigen Erdwissenschaften eine ähnliche Umwälzung in ihren Vorstellungen, wie etwa jene von Kopernikus für die Naturwissenschaften im 16. Jahrhundert. Nicht umsonst lautet der Titel eines Buches des Geowissenschafters Hallam „A revolution in the Earth Sciences; from continental drift to plate tectonics" (1973). Die Plattentektonik erklärt durch ein relativ einfaches Konzept nicht nur zahlreiche, bisher nicht oder nur schwer deutbare Einzelvorgänge, von den Gebirgsbildungen bis zum Vulkanismus, sondern auch die Geodynamik der Erdkruste und in Zusammenhang damit auch die wiederholten Gebirgsbildungen während der Erdgeschichte, die mit der Erdkontraktion allein nicht verständlich gemacht werden konnten. Die neuen Erkenntnisse sind den Ergebnissen, wie sie durch die Raumfahrt und die Weltraumsonden erzielt wurden, durchaus ebenbürtig, sind jedoch – da nicht so spektakulär wie etwa Mondlandungen durch den Menschen – über einen engen Kreis von Fachwissenschaftern kaum hinaus gedrungen. In den Beiträgen zum Internationalen Alfred Wegener-Symposium in Berlin 1980 wird auf die verschiedensten Bereiche eingegangen, die in Zusammenhang mit der Drift der Kontinente von Bedeutung sind. Die Themen reichen von der Plattentektonik über Paläoklima, Paläobiogeographie, Vulkanismus, Geothermik, Metallogenese, Kristallographie, Geophysik, Paläogeographie, Ozeane und Kontinente bis zur Polarforschung (s. Dornsiepen & Haak 1980).

Neuere Erkenntnisse der Plattentektonik für die Geowissenschaften

So haben die neuen Ergebnisse für die Tektonik als Lehre vom Bau der Erdkruste und der auf sie einwirkenden Kräfte, neue Erkenntnisse erbracht. Beschäftigten doch die Alpengeologen bereits frühzeitig die eigentlichen Ursachen der Hebungen, Faltungen, Überschiebungen, sog. „Fenster" u. dgl. Dennoch hat sich die Plattentektonik, wie gezeigt, nicht aus der Alpengeologie entwickelt, sondern aus der Geophysik und der Ozeanographie mit der Meeresgeologie und -paläontologie. Über den neuesten Stand der Plattentektonik informiert am besten das Buch von W. Frisch & M. Meschede 2007.

Über die Zahl und Ausbildung der Platten der Lithosphäre bestehen Meinungsunterschiede, da auch sog. Mikroplatten oder „terranes", als Teilplatten größerer Schollen, unterschieden werden. Allgemein anerkannt sind die amerikanische, afrikanische, eurasiatische, (australisch-) indische, pazifische und antarktische Scholle, dazu kommen die Karibische, Cocos-, somalische, arabische, philippinische und die Nazca-Platte (vgl. Abb. 6).

Was die Geschwindigkeit des „sea-floor spreading" im Bereich des atlantischen Ozeans betrifft, so haben sich die seinerzeit von Wegener angegebenen Werte nicht bewahrheitet. Altersdatierung der Basalte Islands im Bereich der Riftzonen (Abb. 7) wurden etwas zu hoch gegriffen. Die mit modernen Methoden (GPS, „aeroplan tracks" für MORVEL (= „middle oceanic ridges velociting") seit etwa 15 Jahren durchgeführten Messungen in den Spreizungszonen zwischen sämtlichen Platten, einschließlich sogen. Mikroplat-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

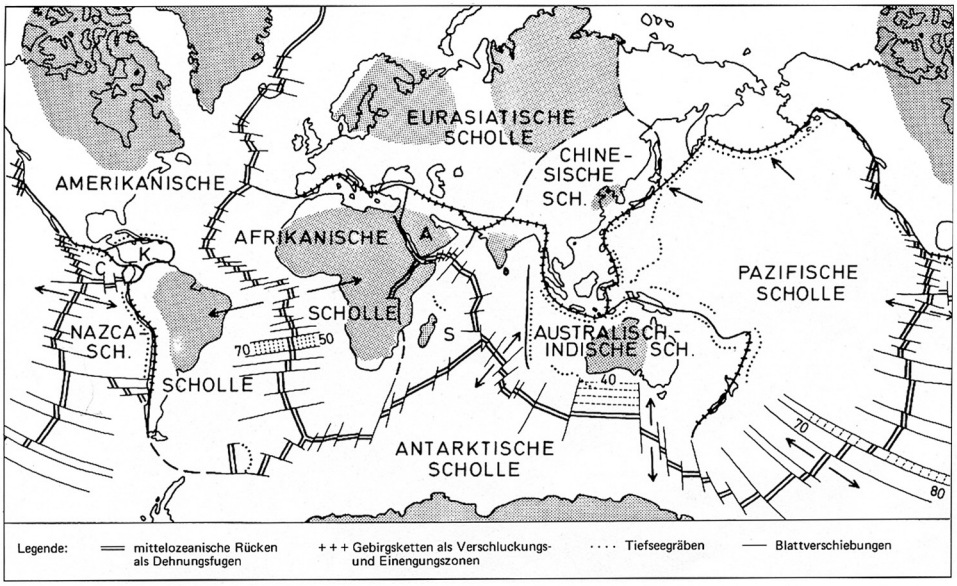


Abb. 6: Platten der Lithosphäre nach dem „plate tectonics"-Konzept. Die mittelozeanischen Rücken (_____) als Dehnungsfugen, Tiefseegräben (…..) und Gebirgsketten (*****) als Verschluckungs- (= Subduktions-) bzw. Einengungszonen und die Gliederung der Lithospähre in Großschollen (Schema). A Arabische Platte, C Cocos-Platte, K karibische Platte, S Somalische Platte, philippinische Platte nicht eigens ausgewiesen. – Blattverschiebungen. → Bewegungsrichtung der Platten. Zahlen = Werte (Jahrmillionen) der Meeresbodenverbreiterung. Raster = präkambrische Schilde. (nach THENIUS 1977). – Fig. 6: Plates of the lithosphere according to the "plate tectonics" concept (after THENIUS 1977).

ten, haben grundsätzlich die Drift bestätigt, indem sie im Millimeter bzw. Zentimeterbereich pro Jahr liegen (DE METS & al. 2010). Für den Nordatlantik und damit zwischen den nordamerikanischen und der eurasiatischen Platte liegen die jährlichen Werte nach obigen Autoren vom Arktis-Becken bis zu den Azoren im Millimeterbereich (11–23mm).

Die Plattentektonik ist nicht nur für die Erdwissenschaften von Bedeutung, sondern auch für die Biowissenschaften. Zunächst aber zu den Erdwissenschaften, wo von einer „new global tectonics" gesprochen wird (DEWEY & BIRD 1970). Zu den am meisten diskutierten Problemen der Geologie zählen zweifellos die bereits erwähnten Gebirgsbildungen oder Orogenesen. Spuren derartiger Orogenesen sind wiederholt aus dem Präkambrium und dem Phanerozoikum nachgewiesen worden. Die gleichfalls bereits erwähnte bekannte Gebirgsbildungstheorie war zweifellos die Kontraktionstheorie, nach welcher die Erde mit einem schrumpfenden Apfel verglichen wurde. Erstmals von BEAUMONT im Jahr 1829 vertreten, fand sie viele Anhänger unter den Alpengeologen wie etwa SUESS (1885, 1909) und KOBER (1955). Diese Kontraktionstheorie konnte zwar die Erscheinungen der jüngsten, nämlich der alpidischen Gebirgsbildung einigermaßen verständlich machen, nicht jedoch die früheren, wie etwa die variszische im Jungpaläozoikum und die kaledonische im Altpaläozoikum, ganz abgesehen davon, dass damit nicht die Unterschiede in den alpidischen Gebirgsketten (Alpen, Anden) erklärt werden konnten.

Hier lassen sich nach DEWEY & BIRD (1970) aufgrund der Plattentektonik zwei Modelle unterscheiden. Einerseits als Ergebnis von Plattenkollisionen, wie sie damit im Prinzip

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 7: Spalt in der Erdkruste im Riftbereich von Island (Grjöfagja südlich von Myvatn). Links nordamerikanische, rechts eurasiatische Platte (Foto: Thenius 2001). – Fig. 7: Split in the earth's crust in the rift location of Iceland (Grjöfagja in the south of Myvatn). Left, North American, on the right Eurasian plate (Photo: Thenius 2001).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

die Auffassungen der Schweizer Alpengeologen R. STAUB (1924) und HEIM (1929) bestätigen, andererseits als Folge der Subduktion einer ozeanischen Platte unter eine kontinentale Scholle, wie beim Anden- oder Kordilleren-Typ in der Neuen Welt. Dabei bildet sich nicht nur ein Faltengebirge im randlichen Bereich des Kontinentes mit entsprechendem Vulkanismus, sondern auch ein Tiefsee-„graben". Ein derartiger Kontinentalrand wird als aktiv bezeichnet (z. B. pazifischer Typ), im Gegensatz zum passiven Kontinentalrand, wie er für die Atlantikküsten charakteristisch ist, wo Subduktionszonen fehlen (atlantischer Typ) (vgl. Abb. 6).

Der Himalaya-Typ ist durch Kollision zweier Kontinentalplatten unter Subduktion des dazwischenliegenden Ozeanbodens entstanden, was auch für die Alpen in noch komplizierterem Ausmaß zutrifft, als im penninischen Bereich der Alpen zwei getrennte Ozeane (Valais-Trog im Norden, Piemont-Trog im Süden) durch Subduktion wieder verschwunden sind. Anzeichen für derartige Kollisionen sind Ophiolithkomplexe in sog. Melangezonen, die aus Hornsteinen, Kissenlaven („pillow lavas"), basischen und ultrabasischen Gesteinen bestehen. Beide Gebirgsbildungstypen unterscheiden sich auch noch durch die Art der Metamorphose, indem beim alpidischen Typ mechanische Kräfte mit einer niedrig temperierten Glaukophanschieferfazies vorherrschen, beim Kordillerentyp hingegen thermische Kräfte auch zur Bildung von Hochtemperaturzonen führen.

Im Bereich der Alpen ist es bei der Gebirgsbildung durch weitreichende Überschiebungen zur Bildung sog. Decken (z. B. Ostalpin) über die vorgelagerte Flysch- (samt Helvetikum) und Molassezone gekommen, wie verschiedene Tiefbohrungen im Bereich der Kalkalpen (z. B. Urmannsau, Berndorf 1) dokumentieren (KRÖLL & WESSELY 1967, KRÖLL et al. 1980). Diese Tiefbohrungen haben Flysch- und Molassesedimente unterhalb der nördlichen Kalkalpen nachgewiesen. Mit derartigen Überschiebungen war zugleich eine Einengung verbunden, die Dimensionen erreichte, mit denen nicht einmal die Vertreter der Kontraktionstheorie gerechnet hatten.

Die mit Kontinentverschiebungen verbundene Plattentektonik hat auch entsprechende Konsequenzen für die angewandte Geologie. Vor allem für die Suche von Erzprovinzen, die gegenwärtig durch Meere getrennt auf verschiedenen Kontinenten vorkommen. Bisher sind zahlreiche Beispiele von Erz- und Mineralprovinzen bekannt geworden, die durch die Kontinentaldrift auseinandergerissen wurden (z. B. Südamerika-Afrika, Nubien-Saudi-Arabien, Indien-Australien, vgl. LEUBE 1978, TARLING & RUNCORN 1973).

Dass die Plattentektonik jedoch gänzlich neue Aspekte für die Genese von Erzlagerstätten erbracht hat sei hier nur erwähnt. Im Bereich des „rift-valley", wo neuer Ozeanboden entsteht, treten die verschiedensten hydrothermalen Lagerstätten für diverse Erze auf (DEGENS 1970, RONA 1976).

Für die Petrologie hat das „plate tectoncs"-Konzept gleichfalls wichtige Erkenntnisse erbracht. Es sei hier nur an die Gesteinsbildung und -metamorphose sowie an den Vulkanismus erinnert. Auf die weit verbreiteten Hochdruck-Tieftemperatur-Metamorphose in den Subduktionszonen mit Glaukophanschiefern und Eklogiten wurde bereits im Zusammenhang mit Gebirgsbildungen hingewiesen. Sie werden vielfach begleitet von Metamorphosen geringen Drucks und hoher Temperatur (z. B. Grünschiefer-Epidot, Amphibolitfazies) sowie von Granitintrusionen (da mit ozeanischer Kruste teilweise auch kontinentales Material subduziert wird), die bei partieller Aufschmelzung Granite und Tonalite (z. B. Rieserfernergruppe in den Ostalpen) ergeben (vgl. WIESENEDER 1981).

Die bereits von BECKE (1903) erkannten Unterschiede in den magmatischen Gesteinen und damit im Vulkanismus, wie pazifische und atlantische Sippe, finden nunmehr gleichfalls eine „natürliche" Erklärung. Aktiver Vulkanismus ist außerhalb aktiver ozeani-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

scher Rücken und Subduktionszonen an Kontinentalrändern vor allem auf ozeanischen Inselketten verbreitet (z. B. Alëuten, Japanische Insel, Sundabogen). Während letztere mit Subduktionszonen in Verbindung gebracht werden können, wird die Entstehung einzelner Vulkaninseln durch Wilson (1965) mit sog. „hot spots" zu erklären versucht. Ein derartiger stationärer „hot spot" im Pazifik führte zur Entstehung der Kette der Hawaii-Inseln, indem die pazifische Platte in nordwestlicher Richtung wanderte. Von diesen Schildvulkan-Inseln sind die östlichsten mit den noch tätigen Vulkanen Mauna Kea und Mauna Loa demnach die jüngsten. Am östlichsten Ende ist eine Insel im Auftauchen begriffen.

Neuere Untersuchungen von Basalten im Bereich mittelozeanischer Rücken haben neue Erkenntnisse über die Basaltgenese und damit auf das primäre Magma erbracht. Waren sog. Komatite bis vor kurzem nur aus archäischen (= präkambrischen) „greenstone belts" von Rhodesien (Sambia), Südafrika und Kanada bekannt (Condie 1980), so konnten derartige Gesteine mit „Spinifex-Gefüge" auch aus eozänen Ophiolithen der Pazifik-Insel Gorgona vor Kolumbien nachgewiesen werden (Dietrich 1981).

Diese Komatite stammen nach der Schmelztemperatur aus Magmakammern unterhalb der Mohorovicic-Diskontinuität. Für etwas höhere Magmakammern sind die Gabbros und für noch höhere die aus tholeitischen Basalten bestehenden „pillow lavas" (Kissenlava) der mittelozeanischen Rücken charakteristisch. Eine Abfolge, die zum Verständnis der Basaltgenese wichtig ist, zugleich jedoch zur Diskussion über die Gesteine der präkambrischen „greenstone belts" geführt hat (damals dünnere sialische Kruste als gegenwärtig).

Für die physische Geographie und damit für die Paläobathymetrie und Paläophysiographie der Weltmeere machte die Plattentektonik nicht nur das Vorkommen von Tiefseegräben und ozeanischen Inselketten verständlich, sondern erklärte nunmehr auch die Entstehung sog. Guyots. Als Guyots werden submarine kegelstumpfartige Erhebungen des Ozeanbodens bezeichnet, mit einer durch die Brandung eingeebneten Oberfläche, die oft mehrere hundert Meter unter der heutigen Meeresoberfläche liegt (vgl. Abb. 2). Schon dadurch ist eine Entstehung durch eustatisch bedingte Meeresspiegelschwankungen und Tsunamis auszuschließen. Die Ozeane wurden mit zunehmender Entfernung von den mittelozeanischen Rücken immer tiefer, was zugleich ein Hinweis auf das Alter des Ozeanbodens ist (s. Seibold 1982, Seibold & Thiede 1997). Die durch die Verdichtung des Ozeanbodens bedingte Subsidenz führt zugleich auch zur Absenkung der ursprünglich im Meeresspiegelniveau befindlichen Vulkaninseln, die heute als Guyots ausgebildet sind.

Auch für die Geophysik erbrachte die Plattentektonik neue Erkenntnisse. Es sei dabei nicht nur auf die im Bereich der alpidischen Gebirge gelegenen Bruchzonen hingewiesen, sondern auch auf jene, die den Zentralgräben der mittelozeanischen Rücken entsprechen (Abb. 2 und 6) und auf die als „transform faults" bezeichneten Blattverschiebungen, welche diese Zone oft hunderte von Kilometern horizontal versetzen. Die wohl bekannteste ist die als Bebenlinie berüchtigte San Andreas-fault in Kalifornien, die im Laufe weniger Jahrzehnte zu Horizontalverschiebungen von mehreren Metern führte und damit auch für das verheerende Erdbeben von San Francisco im Jahr 1906 verantwortlich war.

Für die Paläoklimatologie ist die Plattentektonik primär durch die Verschiebung der Kontinente im Laufe der Erdgeschichte von entscheidender Bedeutung. Diese machen nicht nur der Wechsel von kryogenen (mit zumindest einem Inlandschild im jeweiligen Polbereich als unipolare Vereisung) und akryogenen Perioden während der Erdgeschichte

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

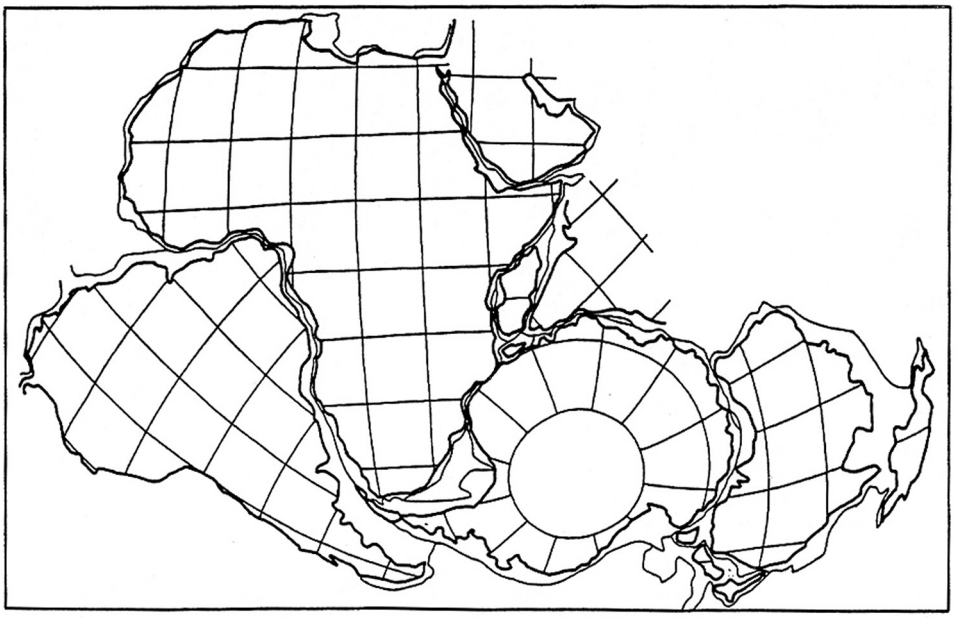


Abb. 8: Rekonstruktion des einstigen Gondwana-Kontinentes nach dem „fit" (Passform) der Kontinentalsockel. Position von Madagaskar und Indien sowie jene von Afro-Amerika zu Antarkto-Australien jedoch hypothetisch (nach THENIUS 1977). – Fig. 8: Reconstruction of the former Gondwana continent after the "fit" (margin form) of the continental shelf. The position of Madagascar and India as well as that of Afro-America to Antarcto-Australia is hypothetical (after THENIUS 1977).

verständlich, sondern erleichtern über die unterschiedliche Zirkulation der Hydrosphäre (z. B. Meeresströmungen) und der Atmosphäre auch das Verständnis um das klimatische Geschehen zu Kalt- und Warmzeiten (THENIUS 1974). Allerdings ist das Geschehen meist etwas komplizierter als vielfach angenommen wird (s. SARNTHEIN 1981, BERGER & al. 1994). Für den Beginn der Vereisung der Antarktis erscheint jedoch die Entstehung der zirkum-antarktischen Meeresströmung im ausgehenden Alttertiär vor etwa 34 Millionen Jahren als Ursache festzustehen. Wie weit die plio-pleistozäne Vereisung der nördlichen Hemisphäre mit der Entstehung des Golfstroms vor ungefähr 3,5 bis 3 Millionen Jahren in Verbindung zu bringen ist, steht zur Diskussion.

Von den einstigen Eiszeiten wird die jungpaläozoische oder Gondwana-Vereisung nur durch einen einstigen einheitlichen Kontinent verständlich. Eine Erkenntnis, die bereits DU TOIT (1937) bei der Rekonstruktion des Gondwana-Kontinentes berücksichtigte. Vereisungsspuren in verschiedener Form sind – wie bereits oben erwähnt – aus Südamerika, Afrika, Vorderindien, der Antarktis und Australien nachgewiesen.

Allerdings sind noch manche Probleme offen, die trotz der Fortschritte bei der Altersdatierung der Vereisungsspuren und der Erkenntnis, dass nicht alle Diamiktite eiszeitlicher Entstehung, also echte Tillite sind, nicht gelöst werden konnten. Auch die Position des afro-südamerikanischen zum antarkto-australischen Kontinent ist nicht endgültig geklärt. Die gegenseitige Lage der beiden Doppelkontinente ist durch den sog. „fit" (Passform) der Kontinentalsockelränder durch Computerberechnungen gesichert (THENIUS 1977) (Abb. 8).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Auch Meeresspiegelschwankungen bzw. Transgressionen, die nicht eustatisch bedingt sind, lassen sich durch die Plattentektonik bzw. das „sea-floor-spreading" Konzept durch die Entstehung submariner Rücken erklären (Seibold 1982). Auch die in den letzten Jahren (Indonesien 2004, Japan 2011) oft verheerenden Tsunamis sind durch Plattenbewegungen bedingt.

Für die Paläontologie hat die Plattentektonik gleichfalls etliche Fortschritte erbracht. So werden manche disjunkte Verbreitungsbilder von Faunen und Floren verständlich. Das vermutlich bekannteste Beispiel ist dafür die gleichfalls bereits erwähnte *Glossopteris*-Flora, die zur älteren Permzeit auf den heutigen Südkontinenten (Südamerika, Afrika, Madagaskar, Antarktis und Australien) und in Indien verbreitet war (Plumstead 1973; Abb. 9). Auch wenn *Glossopteris* nur als Formgattung (für Blätter, Abb. 10) zu bezeichnen ist, so weicht die Glossopteris-Flora in ihrer Zusammensetzung von der gleichaltrigen euramerischen, der Cathaysia- und der Angara-Flora deutlich ab. Die Glossopteris-Flora war die Vegetation der damaligen gemäßigten Klimazone des Gondwana-Kontinents. Dies wird auch durch die Verbreitung der damaligen marinen Eurydesma-Fauna bestätigt, die in den Küstengebieten von Gondwana heimisch war. Auch die Verbreitung der jungpaläozoischen euramerischen Flora wird durch den damals landfesten Kontakt zwischen Europa und Nordamerika verständlich (vgl. auch die variszische Gebirgsbildung).

Auch die Verbreitung nichtmariner Reptilien wie *Mesosaurus* im Unterperm vom südlichen Südamerika und Südafrika und von *Lystrosaurus*, *Kannemeyeria* und C*ynognathus*

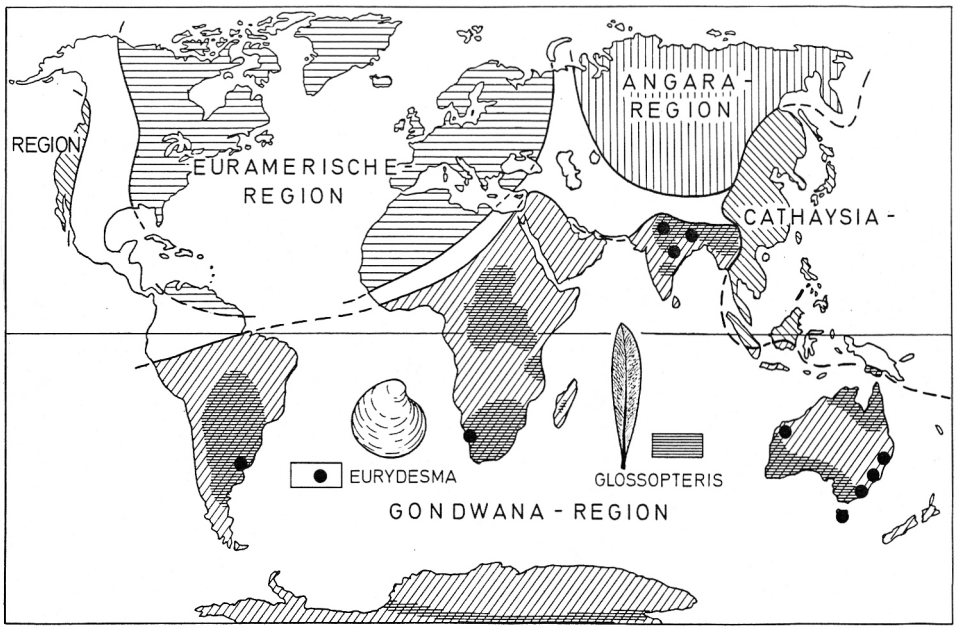


Abb. 9: Die Verbreitung der *Glossopteris*-Flora und der *Eurydesma*-Kaltwasserfaunen im Unter-Perm sowie die Florenregionen zur Zeit des Ober-Karbon/Unter-Perm. Die einstige Verbreitung der *Glossopteris*-Flora lässt sich am einfachsten durch einen Gondwana-Kontinent erklären (nach Thenius 1977). – Fig. 9: The distribution of the *Glossopteris* flora and the *Eurydesma* cold water faunas in the Lower Permian as well as the flora regions at the time of the Upper-Carboniferous-Lower Permian. The former distribution of the *Glossopteris* flora can best be explained by a Gondwana continent (after Thenius 1977).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

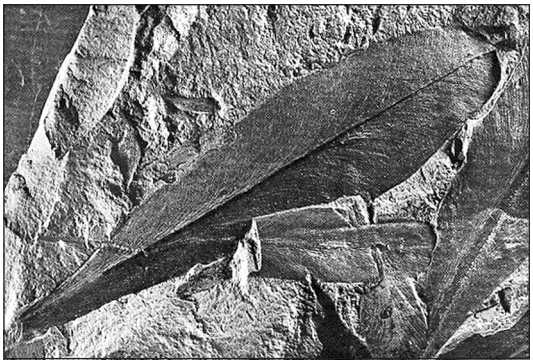


Abb. 10: Blätter des Farnsamers *Glossopteris browniani* aus dem Unter-Perm von Australien, der die *Glossopteris*-Flora ihren Namen verdankt (nach THENIUS 1977). – Fig. 10: Leaves of *Glossopteris browniani* from the Lower Permian of Australia, which gives the *Glossopteris* flora its name (after THENIUS 1977).

als Landbewohner zur älteren Triaszeit wurde gleichfalls nur durch einen einstigen einheitlichen Südkontinent (Gondwana) verständlich (COLBERT 1970, 1972; Abb. 11).

Die Verbreitung der Südwasserkrokodile *Araripesuchus* und *Sarcosuchus* aus der älteren Kreidezeit (Apt) in Südamerika (Brasilien) und Afrika (Niger) erklärt sich nur durch die Existenz eines einstigen Doppelkontinentes (Afro-Amerika) zur damaligen Zeit (BUFFETAUT 1980).

Dies wird bestätigt durch die aus Bohrprofilen der Bahia-Serie in Nordostbrasilien (Provinz Sergipe) und aus der Cocobeach-Serie von Gabun (Westafrika) nachgewiesenen nichtmarinen Ostracodenfaunen des „Wealden" (jüngster Jura – älteste Kreidezeit) durch GREKOFF (1953), KRÖMMELBEIN (1966) und KRÖMMELBEIN & WEBER (1971) (Abb. 12). Sie dokumentieren, dass noch zur älteren Kreidezeit der Südatlantik in diesem Bereich nicht existierte, sondern Brackwasserseen vorhanden waren.

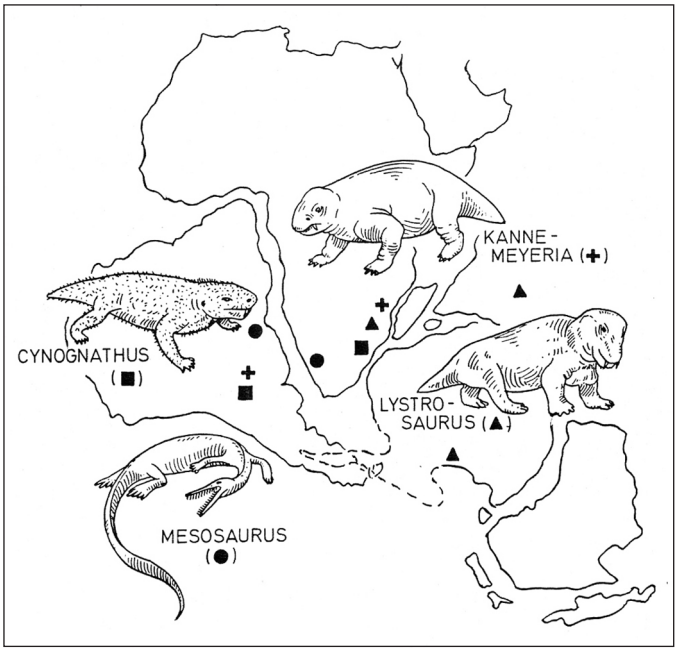


Abb. 11: Der Gondwana-Kontinent und die Verbreitung nichtmariner Reptilien im Unter-Perm (*Mesosaurus*) und zur älteren Triaszeit (*Lystrosaurus, Kannemeyeria, Cynognathus*). *Mesosaurus* = Seebewohner (nach THENIUS 1984). – Fig. 11: The Gondwana continent and the distribution of non-marine reptiles in the Lower Permian (*Mesosaurus*) and in the older Triassic Period (*Lystrosaurus, Kannemeyeria, Cynognathus*). *Mesosaurus* = marine inhabitant (after THENIUS 1984).

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

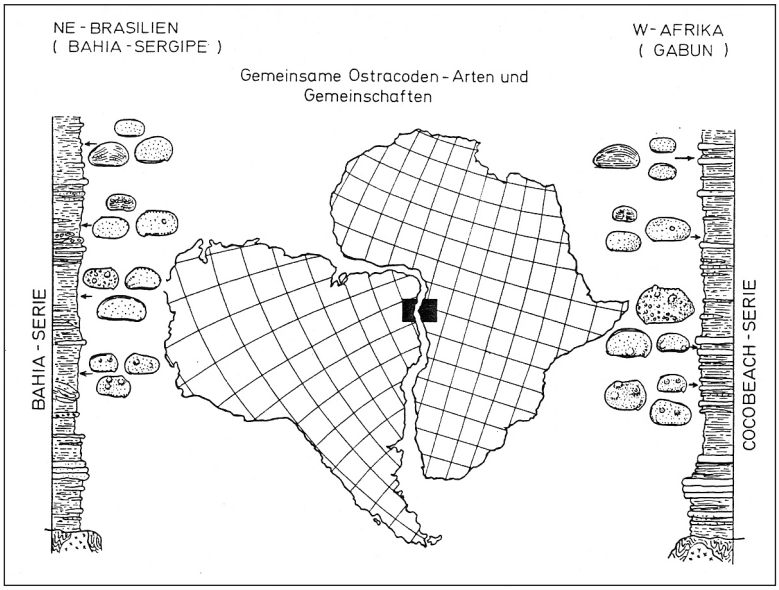


Abb. 12. Profile aus nichtmarinen Becken des „Wealden" (jüngster Ober-Jura und Unter-Kreide) von Nordostbrasilien (Reconcavo-Graben, Prov. Sergipe) und Westafrika (Gabun) und ihre übereinstimmenden Ostracodenfaunen (nach Thenius 1977). – Fig. 12: Profiles from non-marine basins of the "Wealden" (latest Upper Jurassic and Lower Cretaceous) from northeast Brasil (Reconcavo-trench, Prov. Sergipe) and West Africa (Gabun) and their corresponding ostracod faunas (after Thenius 1977).

Wie Ammonitenfaunen aus der jüngsten Unterkreide (Ober-Alb) bzw. der ältesten Oberkreide (Unter-Turon) zeigen, entstand die erste durchgehende Meeresverbindung zwischen dem südlichen und dem nördlichen Atlantik in dieser Zeit (Kennedy & Cooper 1975, Förster 1978), was im Einklang mit den Vorstellungen über die Entstehung des Atlantik durch die Meeresgeologie steht.

Die Bedeutung der Plattentektonik für die Biowissenschaften

Welche Konsequenzen hat nun das „plate tectonics"-Konzept für die Biologie gebracht? Es erscheint verständlich, dass es nicht die Art der Tektonik selbst ist, sondern die Folgerungen, die sich daraus ergeben. Diese betreffen primär die Paläogeographie, indem nunmehr Kontinentalverschiebungen von der Geophysik anerkannt werden. Damit ist angedeutet, dass die Biogeographie jener Zweig der Biowissenschaften ist, der von den neuen erdwissenschaftlichen Erkenntnissen am ehesten „betroffen" ist. Darüber hinaus haben Unternehmung mit Tiefseebooten seit 1977 zum Nachweis von bis dahin unbekannten Faunengemeinschaften die auf Chemosynthese zurückgehen (z. B. Mikroorganismen, Muscheln, Bartwürmer [Pogonophora], Krebse und Stachelhäuter) im Bereich hydrothermaler Tiefseequellen (sog. „Vents") der „rift-valleys" mittelozeanischer Rücken geführt, die für die Biologie völlig unerwartet waren (vgl. Ruffaud & Le Pichon 1977).

Wie die historische Entwicklung zeigt, kam praktisch keinem biogeographischen Befund, soweit er zu paläogeographischen Rekonstruktionen führte, eine definitive Aussa-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

gekraft zu (vgl. HARTMANN 1982, 1988). Es sei hier nur an hypothetische Brückenkontinente wie Lemuria und Archhelenis, die einst Madagaskar und Indien bzw. Südamerika und Afrika miteinander verbunden haben sollen (IHERING 1907, SCLATER 1874) oder an die transpazifischen Landbrücken erinnert, die STEENIS (1963) nach der heutigen Verbreitung von Landpflanzen angenommen hat. Nicht ohne Berechtigung hat HANDLIRSCH (1913) darauf hingewiesen, dass für die heutigen Ozeane wegen der vielen, von den Biogeographen angenommenen Landbrücken kein Platz mehr vorhanden sei. Damit haben sich die Biogeographen selbst ihre Glaubwürdigkeit genommen und es ist bereits aus diesem Grund sehr zu begrüßen, dass nunmehr die Geowissenschaften und da vor allem die Geophysik nicht nur grundsätzlich Kontinentalverschiebungen anerkennen, sondern auch zahlreiche stichhaltige Befunde dafür liefern konnten.

Dennoch wäre es falsch, biogeographischen Befunden jede Bedeutung abzusprechen. Ihre Auswertung ist jedoch nur unter verschiedenen Voraussetzung möglich. Grundsätzlich eignen sich für derartige Aussagen nur jene Organismen, bei denen eine aktive oder passive Verbreitung der Ozeane und Meeresstraßen ausgeschlossen werden kann (z. B. Amphibien, primäre Süßwasserfische, Süßwassermuscheln). Die Fauna und Flora ozeanischer Inseln dokumentiert, welche Rolle die Fernverbreitung nicht nur bei Insekten und Landpflanzen sondern etwa auch bei Reptilien und Spinnen spielt, sei es durch den Wind, sei es durch Meeresströmungen (durch Bauminseln u. dgl.). Bereits aus diesem Grund sind diese Organismengruppen bei paläogeographischen Rekonstruktionen weitgehend auszuschließen. Ähnliches gilt für Landschnecken und Kleinsäugetiere. Es sei hier nur an das seit Jahrzehnten diskutierte Problem der Abgrenzung der orientalischen von der australischen Region und damit an die Wallacea als faunistisches Übergangsgebiet erinnert. Während Neuguinea (Papua) und die östlich angrenzenden Inseln nach der Verbreitung der Säugetiere zur australischen Region zu zählen sind, gehören diese Inseln nach Landpflanzen und Landschnecken zur orientalischen Region. Diese unterschiedlichen Auffassungen widerspiegeln die Ausbreitungsmöglichkeiten der genannten Tier- und Pflanzengruppen. Die Wallace-Linie bzw. die Weber- und die Lydekker-Linie als jeweilige Grenzen zwischen orientalischer und australischer Region bzw. Wallacea als zoogeographisches Übergangsgebiet wären ohne die paläogeographische Entwicklung kaum verständlich. Nach den Vorstellungen der Geophysik und der Meeresgeologen war Australien (samt Neuguinea und Tasmanien) noch bis ins Alt-Eozän mit der (Ost-) Antarktis landfest verbunden. Angaben über eine bereits vor 60 Millionen Jahren erfolgte Trennung Australiens von der Ost-Antarktis haben sich nicht bestätigt. Seit dem Eozän driftete Australien nordwärts und näherte sich im späten Jungtertiär Südostasien, so dass ein Faunen- und Florenaustausch – der jedoch entsprechend der Meeresströmungen ein sehr einseitiger war – möglich wurde. Dieser seit einigen Millionen Jahren andauernde Austausch führte nicht nur zur Einwanderung von Chiropteren und Nagetieren (Muriden), sondern auch von Landpflanzen aus der orientalischen Region in die australische. Die wenigen gegenwärtig von Neuguinea westwärts vorgedrungenen Beuteltiere (z. B. *Phalanger ursinus* und *Ph. celebensis* auf Celebes (Sulawesi), *Phalanger orientalis* auf Timor) sind Inselhüpfer, die sich bestenfalls artlich von ihren Verwandten in Neuguinea unterscheiden. Placentale Großsäugetier(-gattungen), wie *Macaca, Babyrousa* und *Cervus*, sind nach Osten über Halmahera-Ceram nicht hinausgelangt.

Ein wesentliches Argument für einstige Landverbindungen bildeten stets die disjunkten Verbreitungsareale verschiedener taxonomischer Kategorien. Wie SIMPSON (1965) ausgeführt hat, ist die Verbreitung placentaler Säugetiere mit ihren zahlreichen Disjunktionen (z. B. Tapire in Südostasien, Zentral- und Südamerika, Cameliden in Zentralasien

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

und Südamerika; Traguliden, Rhinocerotiden und Elephantiden in Afrika und Südasien) auch ohne Annahme von Kontinentalverschiebungen möglich. Lediglich die Thule- und die Beringbrücke sowie der Panama-Isthmus müssen einst (vorübergehend) vorhanden und der Weg von Afrika nach Asien über die arabische Halbinsel auch für Waldformen gangbar gewesen sein. Die oben erwähnten Disjunktionen sind lediglich Schrumpfareale einst weit verbreiteter Säugetiergruppen.

Wie Kraus (1978) unter Hinweis auf Müller (1974) betont, ist bei Disjunktionen die Unterscheidung von plesiochoren und apochoren Verbreitungsarealen notwendig, analog zu plesiomorph und apomorph im Sinne der phylogenetischen Systematik von Hennig (1950, 1966). Nur ein apochores Verbreitungsbild ist ein Beweis für einen direkten Zusammenhang zweier Areale. Es setzt weiters die genaue Kenntnis verwandtschaftlicher Beziehungen voraus. Dies sei an einem konkreten Beispiel erläutert. Die gegenwärtige Verbreitung der Lungenfische (Dipnoi) ist disjunkt. Sie entspricht einer sog. Gondwana-Verbreitung, indem *Lepidosiren* in Südamerika, *Protopterus* in Afrika und *Neoceratodus* in Australien als primäre Süßwasserfische heimisch sind. Nach der Fossildokumentation waren Lungenfische im Paläozoikum bzw. älteren Mesozoikum weltweit verbreitet und sind auch auf den Nordkontinenten (Nordamerika, Eurasien) und auf der Antarktis nachgewiesen worden. Das Verbreitungsgebiet der rezenten Dipnoi ist demnach ein plesiochores Schrumpfareal, jenes der Lepidosireniden (mit *Lepidosiren* und *Protopterus* als Schwestergattungen) hingegen ein apochores Areal, das den einstigen landfesten Kontakt zwischen Südamerika und Afrika dokumentiert. Allerdings sind daraus keine konkreten Angaben über den Zeitpunkt der Trennung beider Kontinente möglich. Diese ist erst – wie oben geschildert – während der Kreidezeit erfolgt.

Ein analoges Beispiel bietet die Verbreitung der Knochenzüngler (Osteoglossidae) unter den Knochenfischen (Osteichthyes). Auch sie zeigen gegenwärtig eine Gondwana-Verbreitung (mit Ausnahme von *Scleropages* in Südostasien), waren jedoch einst weit verbreitet. Aber auch in diesem Fall stehen die südamerikanischen (*Arapaima*) und afrikanischen („*Heterotis*" = *Clupisudis*) Gattungen einander verwandtschaftlich am nächsten und bilden Schwestergattungen (Nelson 1969). Knochenzüngler und Lungenfische sind altertümliche Elemente, die ähnlich Regenwürmern (Acanthodrilidae: Benhaminae unter den Oligochaeten), Süßwassermuscheln (Unionaceen), Spirostreptiden als Myriopoden, Salmlern (Characoidei) unter den Süßwasserfischen, Zungenlosen (Pipidae mit *Pipa* in Südamerika und *Xenopus* in Afrika) unter den Amphibien, Pelomedusiden-Schildkröten (*Podocnemus* in Südamerika, *Pelomedusa* in Afrika) unter den Reptilien und möglicherweise die Straußartigen (Struthioformes mit *Rhea* in Südamerika und *Struthio* in Afrika) unter den Vögeln nähere Verwandtschaft zeigen, während die erdgeschichtlich jungen Elemente verschieden sind und die Ähnlichkeiten auf Konvergenzerscheinungen (z. B. Kolibris: Nektarvögel; Leguane: Agamen) bzw. Parallelerscheinungen (z. B. Neu- und Altweltaffen; Caviomorpha und Hystricomorha unter den Nagetieren) zurückzuführen sind (Abb. 13). Allerdings sind bei den letztgenannten gemeinsame altweltliche Stammformen nicht auszuschließen, von denen die Ahnenformen der neuweltlichen Affen und Nager erst im frühen Alttertiär (Eozän) per Drift (als Kleinsäugetiere) von Afrika nach Südamerika gelangten. Diese Art der Ausbreitung wäre auch mit der damaligen paläogeographischen Situation (wesentlich schmälerer Atlantik) und den damals herrschenden Meeresströmungen bei Kleinsäugern durchaus vereinbar (vgl. Thenius 1980).

Einer der ältesten Probleme der Biogegraphie ist die Existenz sog. AS-Gruppen (benannt nach der disjunkten Verbreitung in **A**ustralien und **S**üdamerika) und damit die Frage der

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

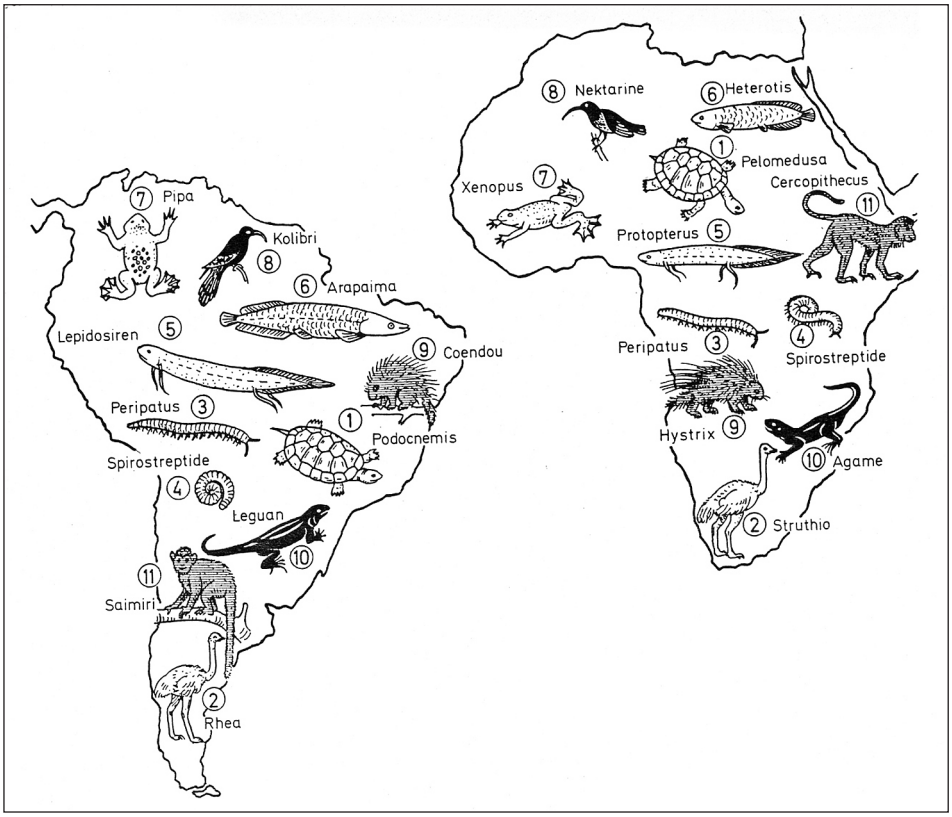


Abb. 13. Kontinentaldrift und Tiergeographie am Beispiel von Südamerika und Afrika. Erdgeschichtlich alte Tiergruppen (weiß) sind meist durch nah verwandte Formen (bei AS-Gruppen meist Schwestergruppen, wie etwa *Lepidosiren*: *Protopterus; Arapaima: Heterotis* [= *Clupisudis*]; *Pipa: Xenopus; Podocnemis: Pelomedusa; Rhea: Struthio*) vertreten, bei geologisch jüngeren Formen (schwarz) in Südamerika und Afrika sind es konvergent entstandene Elemente (z.B. Kolibris: Nektarvögel; Leguane: Agamen). Für die Nagetiere (Caviomorpha) und Affen (Platyrrhini) ist die Diskussion noch nicht abgeschlossen (nach THENIUS 1984). – Fig. 13: Continental drift and animal geography basd on South America and Africa. Geologically old animal groups (white) are mostly represented by closely related forms (at AS-groups mostly "sister groups" such as *Lepidosiren*: *Protopterus; Arapaima: Heterotis* [= *Clupisudis*]; *Pipa: Xenopus; Podocnemis: Pelomedusa; Rhea: Struthio*). Geologically younger forms (black) in South America and Africa are representd by elements that arose convergently (e.g. hummingbirds: nectar birds; Iguanas: Agamas). For Caviomorpha and Platyrrhini the discussion is still open (after THENIUS 1984).

transantarktischen Verbreitung. Auch hier sind plesio- und apochore Verbreitungsbilder zu unterscheiden. Zu den bekanntesten Beispielen zählen die Beuteltiere (Marsupialia) und die „Südbuchen" (*Nothofagus*).

Die Beuteltiere sind gegenwärtig auf die Neotropis (nur *Didelphis* besiedelt als junger [eiszeitlicher] Einwanderer auch weite Teile der Nearktis) und die australische Region (sowie Celebes = Sulawesi) beschränkt. Im Alttertiär waren Beuteltiere (Didelphoidea) auch in Nordamerika und Eurasien heimisch, sie sterben dort jedoch spätestens im Miozän wieder aus. Auch aus dem Alttertiär von Nordafrika konnten Beuteltiere nachgewiesen

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

werden. Die australischen Beutler lassen sich jedoch durchwegs von neuweltlichen Formen aus der Verwandtschaft der Beutelrattenartigen (Didelphoidea) ableiten, was auch für den ausgestorbenen Beutelwolf (*Thylacinus cynocephalus*) Australiens gilt, der einst mit den Borhyaeniden des südamerikanischen Tertiärs in Verbindung gebracht wurde. Demnach sind im Prinzip zwei Deutungen zur Herkunft der australischen Beuteltiere herangezogen worden. Die Ostasienroute, wie sie etwa G.G. Simpson vertritt, oder die Antarktisroute, zu deren Anhängern u.a. C.B. Cox, R. Hoffstetter und der Autor zählen. Das Fehlen neogener Beuteltierreste in Asien und das bereits oben erwähnte rezente Verbreitungsbild der Beutler in der orientalisch-australischen Übergangsregion lassen die Ostasienroute als sehr unwahrscheinlich erscheinen. Dagegen lässt die paläogeographische und paläoklimatologische Situation samt Fossilfunden zur Oberkreide und im Alttertiär die Antarktisroute als durchaus wahrscheinlich erscheinen (vgl. Funde von Polydolopiden [Caenolestoidea, Marsupialia] aus dem Eozän der Westantarktis). Wesentlicher ist jedoch, dass molekularbiologische Befunde die vom US-Paläontologen Szalay (1982) durch morphologische Kriterien begründete Gliederung der Beuteltiere in zwei Großgruppen, nämlich die Ameridelphia und Australidelphia, bestätigten (Springer & al. 2004). Bemerkenswert ist, dass letztere nicht nur die Beuteltiere der australischen Region umfasst, sondern auch die südamerikanischen Microbiotheriiden mit der rezenten Chiloe-Beutelratte (*Dromiciops gliroides* = „*australis*") Chiles als einzig überlebende Art. Die Chiloe-Beutelratte ist das Schwestertaxon der (australischen) Diprotodontia und gilt zugleich als „lebendes" Fossil.

Zur Antarktisroute ist zu sagen, dass Südamerika noch zur Kreide- und zur älteren Tertiärzeit über Inselketten mit der damals noch nicht vereisten Antarktis verbunden war und auch – wie bereits oben erwähnt – Australien noch mit der (Ost-)Antarktis einen Kontinent bildete. Demnach ergibt sich für die Beuteltiere folgendes Szenario. In Asien entstanden, verbeiteten sich beutelrattenartige Formen über Europa nach Nordamerika und von dort nach Südamerika aus, wo sie zur Tertiärzeit einen großen Formenreichtum (einschließlich der Microbiotheriiden) entwickelten. Aus den nach Australien ausgewanderten entstand dann in der Isolation des Kontinentes im Jungtertiär und Quartär die gegenwärtige Artenfülle mit den zahlreichen Konvergenzerscheinungen zu placentalen Säugetieren.

Die heutige Verbreitung der „Südbuchen" (Nothofagidae mit *Nothofagus*) ist eine ähnliche wie jene der Beuteltiere. Sie sind in mehreren Artengruppen auf die australische Region (Neuguinea, Neukaledonien, Australien, Tasmanien und Neuseeland) und das südliche Südamerika (Chile, Argentinien) beschränkt. Nach der Fossildokumentation waren „Südbuchen" im Tertiär auch in der Antarktis heimisch. Die von der Nordhemisphäre gemeldeten Fossilfunde (Pollenkörner) haben sich nicht bestätigt. Die ältesten Fossilfunde stammen aus der Ober-Kreide (Senon) von Neuseeland (Couper 1960, Fleming 1962). Bemerkenswert ist die heutige Verbreitung von *Nothofagus* mit der *N. fusca*-Gruppe in Neuseeland, Tasmanien und Südamerika, mit der *N. menziesii*-Gruppe in Ostaustralien, Tasmanien, Neuseeland und Südamerika und mit der N. *brassii*-Gruppe in Neuguinea und Neukaledonien. Letztere dominierte in den Tertiärwäldern Australiens, Neuseeland, Südamerika und der Antarktis, verschwindet jedoch mit der ersten pleistozänen Vereisung. Arten der *N. fusca*- und der *N. menziesii*-Gruppe sind im Tertiär selten und treten erst im Quartär häufiger auf. Das rezente Verbreitungsgebiet der *N. brassii*-Gruppe ist somit ein plesiochores Schrumpfareal, das durch die Klimaverschlechterung erklärt werden kann. Für die beiden übrigen Artengruppen ist zwar auch eine Arealverkleinerung festzustellen, doch ist das Verbreitungsbild mangels entsprechender Ausbrei-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

tungsmöglichkeiten über derart weite Ozeangebiete nur durch eine einstige Transantarktisroute zu erklären, was nach den oben geschilderten paläogeographischen Befunden durchaus möglich ist.

Dass dennoch noch zahlreiche Probleme in der Biogeographie ungelöst sind, sei nicht verschwiegen. Es sei hier nur an Madagaskar und seine Fauna und Flora erinnert. Hier und auch in anderen Fällen können erst weitere Untersuchungen Klarheit schaffen.

Noch ein weiterer Aspekt, der für die Biologie neue Erkenntnissse erbracht hat ist die Art der Entstehung von vulkanischen Ozean-Inseln, wie die Inselketten etwa von Hawaii und Galápagos durch „hot spots". Es sollen hier nur die Galápagos-Inseln mit den marinen und terrestrischen Leguanen (*Amblyrhynchus cristatus* und *Conolophus*) angeführt werden. Wie bereits oben erwähnt ist das Alter dieser Inseln durch das Verschieben der jeweiligen Ozeanplatten verschieden. Während das Alter der Hawaii-Inseln durch die Verschiebung der Pazifik-Platte nach (Nord-)Osten nach Südosten abnimmt, ist entsprechend der Wanderung der Nazca-Scholle nach (Süd-)Osten Fernandina als westlichste Insel die jüngste, San Christobal im Osten die älteste. Während das Alter der Galápagos-Inseln von 4 Millionen bis zu 35.000 Jahren geschätzt wird, liegt die Trennung der marinen und terrestrischen Leguane von Galápagos nach molekulargenetischen Befunden mindestens 10 Millionen Jahre zurück (STEINFARTZ in ZACHOS & HABEL 2011). Da nach geologischen Befunden das Alter des Galápagos-Hotspots wesentlich höher ist als die heutigen Inseln liegt die Annahme nahe, dass ihre Besiedelung durch die Vorfahren der Leguane auf gegenwärtig längst versunkenen Inseln erfolgte. Ein Beispiel der Phylogeographie.

Abschließend zu diesem Kapitel sei noch auf einen Problemkreis hingewiesen, der mit der Kontinentaldrift und damit mit der Plattentektonik in ursächlichem Zusammenhang stehen dürfte. Nach VALENTINE & MOORES (1970) ist eine Korrelation zwischen der jeweiligen Zahl der Kontinente bzw. Kontinentalschollen und der Faunendiversität von Flachmeerbewohnern (unter den Invertebraten) festzustellen. Die geringe Zahl der Familien unter den marinen Wirbellosen fällt mit der Dauer der Existenz der Pangaea zur Perm-Triaszeit zusammen. D.h., die Länge der Küstenlinien war damals deutlich geringer als vor und auch nach der Existenz von Pangaea.

Dank

Für die Umsetzung des handschriftlichen Manuskriptes in den druckfertigen Text möchte ich Frau Karin LIPPERT herzlichst danken. Für die Beschaffung von Literatur sei hier stellvertretend für alle Bibliothekarinnen und Bibliothekare Herrn Ass.-Prof. Mag. Dr. Karl RAUSCHER, für die Reproduktion der Illustrationen Herrn Rudolf GOLD, sämtliche Institut für Paläontologie der Universität Wien, bestens gedankt.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Mag. Dr. Bernhard GRASEMANN, Department für Geodynamik und Sedimentologie der Universität Wien, für wertvolle Literaturhinweise.

Literatur

AMPFERER O., 1906: Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. Jb. k.k. geol. R. Anst. 56, 539–622. Wien.

AMPFERER O., 1941: Gedanken über das Bewegungsbild des atlantischen Ozeans. Sitz.-Ber. Akad. Wiss., math.-naturwiss. Kl. I, 150, 19–35. Wien.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

ANONYMUS, 2006: Neues Forschungsschiff Chikyu fertiggestellt. Naturw. Rdsch. 59(2), 109–110. Stuttgart.

ARGAND E., 1922: La tectonique de l'Asie. Abh. 13. Intern. Geol. Kongr. 1 (5), 171–372. Brüssel.

ARLDT Th., 1910: Referat über R. F. SCHARFF: Über die Beweisgründe für eine frühere Landbrücke zwischen Nordamerika und Nordeuropa. Proc. R. Irish Acad. 28, 1–28. Naturw. Rdsch. 25, 86–87. Berlin.

BEAUMONT E. de, 1829: Extrait d'une série de recherches sur quelques-unes de revolutions de la surface du globe. Ann. Sci. natur. 18. Paris.

BECKE F., 1903: Über Mineralbestand und Struktur der krystallinischen Schiefer. Denkschr. K. Akad. Wiss., math.-naturw. Kl. 75, 1–53. Wien.

BEIERSDORF H., 1992: 24 Jahre wissenschaftliches Tiefbohren. Eine Ära bahnbrechender geowiss. Erkenntnisse im Überblick – und wie geht es weiter? Die Geowiss. 10 (11), 307–313. Weinheim.

BLACKETT P. M.S., BULLARD E. & RUNCORN S. K. (eds.), 1965: A symposion on continental drift. Philos. Trans. roy. Soc. (A), 258, X + 323 S. London.

BUFFETAUT E., 1980: Die biogeographische Geschichte der Krokodilier. Berliner Geowiss. Abh. (A), 19, 28–30. Berlin.

COLBERT E. H., 1970: Antarctic Gondwana tetrapods. 2nd Gondwana-Symp. 659–664. Pretoria.

COLBERT E. H., 1972: Early Triassic Tetrapods and Gondwanaland. XVIIe Congr. Internat. Zool, Thème 1, 1–27. Monte Carlo.

CONDIE K. C., 1980: Archean greenstone belts. Developm. in Precambr. Geol. 3, 1–550. Amsterdam.

COUPER R. A., 1960: Southern hemisphere Mesozoic and Tertiary Podocarpaceae and Fagaceae and their palaeogeographic significance. Proc. Roy. Soc. London (B), 152, 491–500. London.

DEGENS E. T., 1970: Sea Floor Spreading: Lagerstättenkundliche Untersuchungen im Roten und Schwarzen Meer. Die Umschau 70, 268–274. Frankfurt/M.

DE METS Ch., GORDON R. G. & ARGUS D. F., 2010: Geologically current plate motions. Geophys. J. Intern. 181, 1–80.

DEWEY J. F. & BIRD J. M., 1970: Mountain belts and new global tectonics. J. geophys. Res. 75, 2625–2647. Richmond.

DIETRICH V. J. 1981: Basaltgenese unter mittelozeanischen Rücken. Vortrag Österr. Geol. Ges. v. 9.4.1981. Wien.

DIETZ R. S. 1961: Continent and ocean-basin evolution by speading of the sea floor. Nature 190, 854–857. London.

DORNSIEPEN U. & HAAK V. (Red.), 1980: Internationales Alfred Wegener-Symposium. Berliner Geowiss. Abh. (A) 19, 1–263. Berlin.

FISHER O., 1904: Physics of the Earth Crust. Macmillan & Co., London.

FLEMING C. A., 1962: New Zealand Biogeography. A paleontologist's approach. Tuatara 10, 53–108. Wellington.

FÖRSTER R., 1978: Evidence for an open seaway between northern and southern Proto-Atlantic in Albian Times. Nature 272 (5649), 158–159. London.

FRISCH W. & MESCHEDE M., 2007: Plattentektonik, Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung. 2. Aufl., 1–196 S., Wiss. Buch-Ges., Darmstadt.

HALLAM A. 1973: A revolution in the Earth Sciences. From continental Drift to plate tectonics. IX + 127 S. Clarendon Press, Oxford.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

HANDLIRSCH A., 1913: Beiträge zur exakten Biologie. Sitz. Ber. Akad. Wiss. math.-naturwiss. Kl. I, 122, 361–481. Wien.

HARTMANN G., 1982: Gondwana und das rezente Faunenbild. Verh. Dtsch. Zool. Ges., 1982, 127–144. Stuttgart.

HARTMANN G., 1988: Gibt es biologische Argumente zur Entstehung der Süderdteile? Die Geowiss. 6 (9). Weinheim.

HEIM A., 1929: An der Erkenntniswurzel alpiner Tektonik. Vierteljahrs-Schr. naturforsch. Ges. 74, Nachlese No. 29, 212–223. Zürich.

HENNIG W., 1950: Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik. Deutscher Zentralverlag, Berlin.

HENNIG W., 1966: Phylogenetic systematics. Illinois Press, Urbana.

HESS H. H., 1962: History of the ocean basin. In: ENGEL, A. E.J., JAMES H. L. & LEONARD B. F. (eds.): Petrologic studies: a volume in honor of A. F. Buddington. 599–620, Geol. Soc. Amer. USA.

HOLMES A., 1931: Radioactivity and Earth movements. Trans. Geol. Soc. Glasgow 18, 559–606. Glasgow.

IHERING H. v., 1907: Archhelenis and Archinotis. 1–350 S. Engelmann, Leipzig.

KENNEDY W. J. & COOPER M., 1975: Cretaceous ammonite distributions and the opening of the South Atlantic. J. geol. Soc. 131, 283–288. London.

KOBER L., 1955: Bau und Entstehung der Alpen. 2. Aufl. 1–379. Deuticke, Wien.

KÖPPEN W., 1922: Über die Kräfte, welche die Kontinentalverschiebungen und Polwanderungen bewirken. Geol. Rundschau 12, 314–320. Leipzig.

KRAUS O., 1978: Zoogeography and plate tectonics. Introduction to a general discussion. Verh. naturw. Ver. Hamburg (n.F.), 21/22, 33–41. Hamburg.

KRÖLL A. & WESSELY G., 1967: Neuere Erkenntnisse über Molasse, Flysch und Kalkalpen auf Grund der Ergebnisse der Bohrung Urmannsau 1. Erdöl-Z. 83, 342–353. Hamburg.

KRÖLL A., PLÖCHINGER B. & WACHTEL G., 1980: Exkursion in den Raum Hernstein – Hohe Wand und zur Bohrung Berndorf 1 am 29. Sept. 1979. Mitt. Österr. Geol. Ges. 73, S. 328. Wien.

LEUBE A., 1978: A rewiew of African and South american ore provinces separated by continentaldrift. Schr. Reihe erdwiss. Komm. Österr. Akad. Wiss. 3, 9–23. Wien.

MCKENZIE D. P. & PARKER R. L., 1967: The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. Nature 216, 1276–1280. London.

MORGAN W. J., 1968: Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. J. geophys. Res. 73, 1969–1982. Richmond.

MÜLLER P., 1974: Aspects of Zoogeography. VII + 208 S. Junk Publ., The Hague.

NELSON G. J., 1969: Infraorbital bones and their bearing on the phylogeny and geography of osteoglossomorph fishes. Amer. Mus. Novitates, 2394, 1–37. New York.

PICKERING W. H., 1907: The place origin of the moon – the volcanic problem. J.Geol., 15, 23–38. Chicago.

PLUMSTEAD E. P., 1973: The late Palaeozoic Glossopteris Flora. In: HALLAM, A. (ed.): Atlas of Palaeobiogeography, 187–205. Elsevier, Amsterdam.

RIFFAUD C. & LE PICHON X., 1977: Expedition "Famous". 3000 Meter unter dem Atlantik. 1–304 S. Kiepenheuer & Witsch, Köln.

RONA P. A., 1976: Plate tectonics and mineral resources. In: WILSON, J. T. (ed.): Continents drift and continents aground., 207–216. Freeman & Co., San Francisco.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Runcorn S. K.,1956: Palaeomagnetic comparisons between Europe and north America. Proc. geol. Assoc. Canada, 8, 77–85. Ottawa.

Sarnthein M., 1981: Die atmosphärische und ozeanische Zirkulation im Spiegel von Tiefwassersedimenten. Vortrag Österr. Geol. Ges. 6. April 1981. Wien.

Schwinner R., 1942: Der Begriff der Konvektionsströmung in der Mechanik der Erde. Gerlands Beitr. Geophysik, 58, 119–158. Leipzig.

Sclater P. L., 1874: The geographical distribution of mammals. Manchester Sci. Lect., 5 & 6, 202–219. Manchester.

Seibold E., 1974: Der Meeresboden. 1–483. Springer, Berlin-Heidelberg.

Seibold E., 1982: Die Ozeane im Wandel der Zeiten. Nova Acta Leopoldina. Abh. dtsch. Akad. Naturf., 244. Halle.

Seibold E. & thiede J., 1997: Die Geschichte der Ozeane nach Tiefseebohrungen. Abh. math.-naturw. Kl., Akad. Wiss & Liter. Mainz, Jg. 1997, Nr. 2, 1–62. Steiner, Stuttgart.

Simpson G. G., 1965: The Geography of Evolution. XI + 249 S. Chilton Books, New York.

Smith A. & Hallam G., 1970: The fit of the Southern Continents. Nature 225 (5228), 139–144. London.

Springer M. S., Stanhope M. J., Madsen O. & de Jong W. W., 2004: Molekular consolidate the mammal tree. Trends in Ecol. & Evol. 19, 430–438.

Staub R., 1924: Der Bau der Alpen. Beitr. Geol. Karte Schweiz, 52, (n.F. 82), 1–272. Bern.

Steenis C. G.G. J. van, 1963: Transpacific floristic affinities, particularly in the tropical zone. In: Gressit J. B. (ed.): Pacific Basin Biogeography, 219–231. Bishop Mus. Press, Honolulu.

Steinfartz S., 2011: When hotspots meet: The Galapagos-Islands: A hotspot of species endemism based on a volcanic hotspot centre. In: Zachos F. E. & Habel J. C. (eds.): Biodiversity Hotspots. 453–468. Springer, Berlin-Heidelberg.

Suess E., 1885: Das Antlitz der Erde I. 768 S. Tempsky & Freytag, Prag & Leipzig.

Suess E., 1909: Das Antlitz der Erde III/2. IV + 789 S. Tempsky & Freytag, Wien-Leipzig.

Suess F. E., 1938: Der Bau der Kaledoniden und Wegeners Hypothese. Zbl. Miner. etc. B., Jg. 1938, (9), 321–337. Stuttgart.

Szalay F. S., 1982: A new appraisal of marsupial phylogeny and classification. In: Archer, M. (ed.): Carnivorous marsupials. Roy. Zool. Soc. New South Wales, 624–640. Sydney.

Tarling D. H. & Runcorn S. K. (eds.), 1973: Implications of continental drift to the Earth Sciences I & II, XVI + XI u. 1184 S. Acad. Press, London & New York.

Taylor F. B., 1910: Bearing of the Tertiary mountain belts on the origin of Earth's plan. Bull. Geol. Soc. Amer. 21, 179–226. USA.

Thenius E., 1974: Eiszeiten – einst und jetzt. Ursachen und Wirkungen. Kosmos-Bibl. 234. Franckh, Stuttgart.

Thenius E., 1977: Meere und Länder im Wechsel der Zeiten. Verständl. Wiss. 114, X + 200 S. Berlin-Heidelberg.

Thenius E., 1980: Grundzüge der Faunen- und Verbreitungsgeschichte der Säugetiere. Eine historische Tiergeographie. 2. Aufl., 1–357. G. Fischer, Stuttgart.

Thenius E., 1980: Der Beitrag österreichischer Geowissenschafter zum „sea-floor spreading" – und „plate tectonics concept". Verh. Geol. B.-Anst., Jg. 1979, 407–414. Wien.

Thenius E., 1984: Die Plattentektonik und ihre Bedeutung für die Geo- und Biowissenschaften. Das neue erdwissenschaftliche Weltbild. Verh. naturw. Ver. Hamburg (NF) 27, 5–42. Hamburg.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

THENIUS E., 1988: Otto Ampferer, Begründer der Theorie der Ozeanbodenspreizung. Die Geowissenschaften 6, 103–105. Weinheim.

TOIT A. L. DU, 1937: Our wandering continents. An hypothesis on continental drifting. XIII + 366 S. Liver & Boyd, Edinburgh & London.

VALENTINE J. W. & MOORES E. M., 1970: Plate tectonics regulation of faunal diversity and sealevel: a model. Nature 228, 657–659. London.

VINE F. J. & MATTHEWS D. H., 1963: Magnetic anomalies over oceanic ridges. Nature 199, 947–949. London.

WEGENER A., 1912a: Die Entstehung der Kontinente. Petermans Geogr. Mitt. 58, 185–195, 253–256 u. 305–309. Gotha.

WEGENER A., 1912b: Die Entstehung der Kontinente. Geol. Rundschau 3, 276–292. Leipzig.

WEGENER A., 1915: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 1. Aufl. IV + 214 S. Vieweg & Sohn, Braunschweig.

WEGENER A., 1920: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 2. Aufl. Die Wissenschaft Nr. 66, 1–135. Vieweg, Braunschweig.

WEGENER A., 1929: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 4. Aufl XIV + 231 S. Vieweg & Sohn AG, Braunschweig.

WIESENEDER H., 1981: Vulkanismus und Gesteinsbildung im Lichte neuer geowissenschaftlicher Hypothesen. Naturw. Rundschau, 34, 10–16. Stuttgart.

WILSON J. T., 1965: A new class of faults and their bearing on continental drift. Nature, 207, 343–347. London.

ZACHOS F. E. & HABEL J. C. (eds.), 2011: Biodiversity Hotspots. Distribution and Protection of Conservation Priority Areas. XVII + 546 S. 76 Abb., Springer, Berlin/Heidelberg.

ZÖLLER L. & HARMBACH U., 2009: Tiefseefurche statt Tiefseegraben. Geowiss. Mitt. Nr. 36, 28–30. Bonn.

Anschrift:

Univ.-Prof. Dr. Erich THENIUS, Institut für Paläontologie der Universität Wien, Geozentrum, Althanstraße 14, 1090 Wien.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 2012

Band/Volume: 148_150

Autor(en)/Author(s): Thenius Erich

Artikel/Article: 100 Jahre Kontinentalverschiebungstheorie. Von der Hypothese A. WEGENER'S zur Realität der Plattentektonik. Ein wissenschaftshistorischer Bericht. 75-100