

Plattentektonik, die alles verbindende Theorie

Von der Sintflut, der Kontraktion der Erde und von schwimmenden Kontinenten

1 Die frühen Naturforscher

1.1 Die Sintflut und einer, der seiner Zeit voraus war

Schon früh fiel Kartografen, Naturforschern, Philosophen und auch Theologen auf, was uns allen beim Betrachten einer Weltkarte ins Auge sticht: Die Küstenlinien Afrikas und Südamerikas passen diesseits und jenseits des Atlantiks beinahe perfekt zueinander. Der flämische Kartograph Abraham Ortelius (1527-1598) gilt als der erste, der deshalb vermutete, dass die Kontinente früher zusammengehängen hätten. In seinem Werk ‚Thesaurus Geographicus‘ von 1596 mutmasst Ortelius, die Kontinente seien „durch Erdbeben und Fluten“ zerbrochen, so dass dadurch Amerika, Afrika und Europa entstanden seien. Die Ähnlichkeit der beiden Küstenlinien ist in seinem ‚Theatrum Orbis Terrarum‘¹ denn auch sehr deutlich zu erkennen (Abb 1).

In einer Zeit, als die Sintflut allgemein als real angesehen wurde und die Kirche Erklärungsansätze ausserhalb des engen Rahmens der Bibel mit Ächtung und Publikationsverboten belegte, wird auch Ortelius bei seiner Formulierung „Erdbeben und Fluten“ kaum an etwas anderes gedacht haben. Sicher ist, dass etliche spätere Autoren davon ausgingen, dass die Erdoberfläche von plötzlichen Katastrophen wie der Sintflut geformt worden sein musste. Damit standen sie im Einklang mit der biblischen Vorstellung, wonach die Erde innerhalb eines kurzen Zeitraumes erschaffen wurde und gerade einmal einige tausend Jahre alt war. Einer von ihnen war der französische Mönch François Placet im Jahr 1658 mit der Schrift ‚La corruption du grand et du petit monde, où il est montré qu'avant le déluge, l'Amérique n'était point séparée des autres parties du monde‘². Ihm zufolge hatte Amerika einst eine zusammenhängende Landmasse mit Afrika und Europa gebildet, die bei der Sintflut zerrissen wurde. Dadurch sei der Atlantik entstanden – und das antike, mythische Inselreich Atlantis untergegangen.

In seinem Werk ‚Sacred Theory of the Earth‘³ von 1681 stellte sich der englische Theologe Thomas Burnett (1635-1715) riesige wassergefüllte Hohlräume im Innern der Erde vor. Die Sintflut sah er als Ergebnis eines Einbruches der Erdoberfläche über diesen Hohlräumen, denn er war der Ansicht, die Wassermenge in den Ozeanen könne für

die Sintflut nicht ausreichend gewesen sein. Dabei habe die Erdoberfläche ihre heutige Form als „widerliche Ruine“ der zuvor makellosen Erde angenommen (Abb. 2). Burnett versuchte damit, Widersprüche zwischen Wissenschaft und biblischem Weltbild zu überbrücken und bewies Wagemut. Was heute als wissenschaftsfeindliches Phantasiekonstrukt erscheint, war ein Versuch, die Sintflut physikalisch plausibel zu erklären und deren Wasserbedarf in Form einer einfachen Massenbilanz zu quantifizieren. Zu seiner Zeit wurde dies als bibelfeindlich und letztlich gotteslästerlich wahrgenommen, es ist jedoch auch ein Zeichen dafür, dass sich das biblisch dominierte Weltbild im Umbruch befand.

Im Lauf des 18. Jahrhunderts begannen immer mehr Wissenschaftler in der Natur statt in der philosophischen Lehrstube nach Antworten zu suchen. Der rapide Fortschritt in der Arbeitsweise und in den Schlussfolgerungen, die 100 Jahre nach Erscheinen von Burnetts „heiliger Theorie“ schon möglich waren, zeigt sich in der folgenden Äusserung Benjamin Franklins, einem der Gründerväter der Vereinigten Staaten von Amerika, der unter anderem auch als Naturwissenschaftler tätig war. Nachdem er in England fossile Muschelschalen weit oberhalb des Meeresspiegels gefunden hatte, und sich fragte, wie das Meer einst dorthin hätte gekommen sein können, schrieb er 1782 in einem Brief an einen französischen Geologen: „Solche Veränderungen in den äusseren Bereichen der Erde scheinen mir unwahrscheinlich zu sein, wenn die Erde bis zum Mittelpunkt fest wäre. Ich stelle mir daher vor, dass die inneren Bereiche eine Flüssigkeit von weitaus höherer Dichte und höherem spezifischen Gewicht sein könnten als irgendeine der festen Substanzen, die wir kennen und dass deshalb die äusseren Bereiche auf oder in der Flüssigkeit schwimmen. Damit wäre die Oberfläche der Erde eine Schale, die durch die heftigen Bewegungen der Flüssigkeit, auf der sie schwimmt, zerbrechen und in Unordnung geraten kann (...).“ Dies zeugt von einer Vorstellung vom Inneren der Erde, die ihrer Zeit weit voraus war.

Ein grundlegend neues Indiz lieferte kurz danach der deutsche Naturforscher Alexander von Humboldt (1769-1859), der während seiner Südamerikaexpedition von 1799-1804 bemerkte, dass die Geologie dies- und jenseits des Südatlantiks teilweise verblüffend ähnlich war. In seinen Abhandlungen von 1801 und 1845 spekulierte er allerdings eher weniger originell, der Atlantische Ozean sei ein durch die katastrophale Kraft des Wassers ausgehöhlt Tal.

Der amerikanische Geograph Antonio Snider-Pellegrini (1802-1885), der in Paris lebte, veröffentlichte 1858 in sei-

¹ Lateinisch für Atlas

² Das Auseinanderbrechen grosser und kleiner Welten, oder wie sich zeigt, dass Amerika vor der Sintflut nicht von den anderen Teilen der Welt getrennt gewesen ist.

³ Die heilige Theorie von der Erde.



Abb. 1

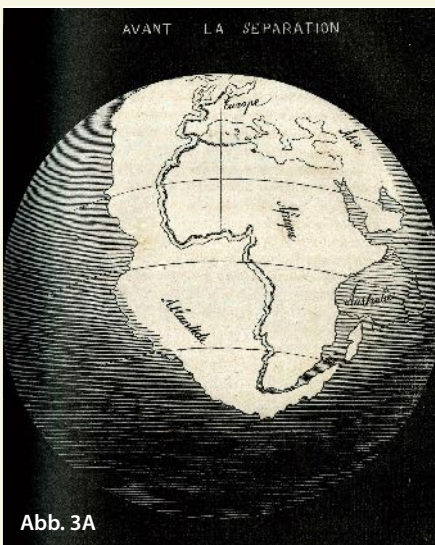


Abb. 3A

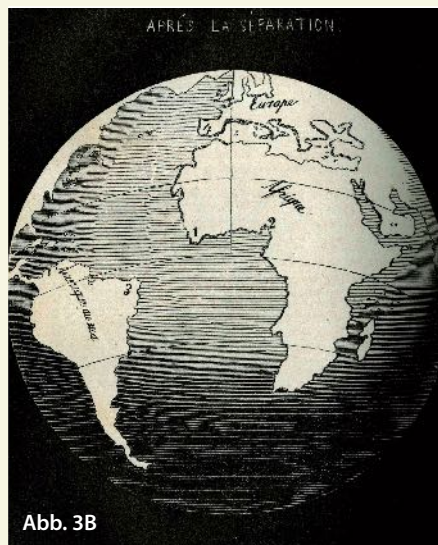


Abb. 3B



Abb. 2A

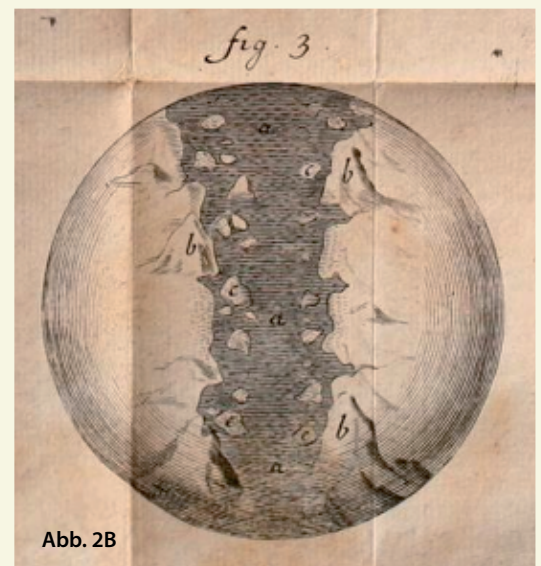


Abb. 2B

Abb. 1: Atlas von Abraham Ortelius, erstmals veröffentlicht 1570.

Abb. 2: Thomas Burnetts wassergefüllte Hohlräume im Querschnitt (A) und die durch die Sintflut getrennten Kontinente (B). Aus: Sacred Theory of the Earth, 1681.

Abb. 3: Darstellung des Globus nach Antonio Snider-Pellegrini (A) vor und (B) nach der Trennung der Kontinente. Aus: La création et ses mystères dévoilés, 1858.

nem Werk „La création et ses mystères dévoilés“⁴ eine sehr fortschrittlich anmutende Karte, auf der die Alte und die Neue Welt mit und ohne trennenden Ozean zu sehen sind (Abb. 3). Für Snider-Pellegrini gab es neben der Ähnlichkeit der Küstenlinien noch ein weiteres Argument: Er verwies auf identische Pflanzenfossilien in Steinkohlelagerstätten auf dem amerikanischen wie auch auf dem europäischen Kontinent, welche sich nicht über den Atlantik in seiner heutigen Ausdehnung hätten verbreiten können. Er nahm deshalb durchaus progressiv ein Auseinanderbrechen der Kontinente an, auch er machte aber noch immer in rückwärts gewandter Sichtweise die Sintflut dafür verantwortlich.

⁴ Die Schöpfung und die Enthüllung ihrer Mysterien.

1.2 Die Fixisten benötigen Landbrücken

Mitte des 19. Jahrhunderts beschleunigte sich der Rückzug der biblischen Vorstellungen aus der Wissenschaft, wodurch neue Lösungsansätze möglich wurden. Anstelle der Vorstellung, dass die Erdoberfläche innerhalb kurzer Zeiträume von katastrophalen Ereignissen wie der Sintflut geformt wurde (*Katastrophismus*), setzte sich der *Aktualismus* durch. Man ging nun davon aus, dass alle geologischen Erscheinungen das Ergebnis von Prozessen seien, die auf gleiche Weise auch in der Gegenwart ablaufen. Als Konsequenz akzeptierte man, dass es z. B. Millionen von Jahren gedauert haben konnte, bis sich ein Fluss durch ein Gebirge gegraben hatte. Diese neue Vorstellung von geologischen Zeiträumen trug massgeblich dazu bei, die

wortwörtliche Auslegung der Bibel in Zweifel zu ziehen, wonach die Erde lediglich wenige tausend Jahre alt sei.

Von beweglichen Kontinenten wollte jedoch mit Ausnahme einiger Aussenseiter noch niemand etwas wissen. Für die meisten Wissenschaftler war im ausgehenden 19. Jahrhundert unbestritten, dass Kontinente und Ozeane ihre Form und Lage seit der Entstehung der ersten festen Kruste auf der, einst als glutflüssig angenommenen Erde nicht mehr verändert hatten, dass sie also fix an Ort und Stelle blieben. Diese Sichtweise wird deshalb als **Fixismus** bezeichnet.

Spätestens seit den Reisen Humboldts wusste man allerdings, dass zwischen der Flora und Fauna beidseits des Atlantiks markante Ähnlichkeiten bestehen. Mit seinem Werk „On the Origin of Species“⁵ von 1859 legte Charles Darwin (1809-1882) den Grundstein für die moderne Biologie, die fortan von der Veränderlichkeit der Organismen und deren Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Lebensräume ausging. Geologen fanden zudem nach und nach auf allen Kontinenten Fossilien von Tieren und Pflanzen, die darauf schliessen liessen, dass sich die Tier- und Pflanzenvergesellschaftungen auf den meisten heutigen Kontinenten nicht völlig isoliert voneinander entwickelt haben konnten. Dies alles bedurfte in Anbetracht der Lehre von fixen Kontinenten und Ozeanen einer Erklärung seitens der Geologie. Die Erklärung fand man in der sogenannten **Landbrücken-Theorie**, wonach zwischen den Kontinenten einst Landbrücken lagen, ähnlich jener, die sich heute zwischen Süd- und Nordamerika befindet. Diese Landbrücken seien dann nach und nach in den Ozeanen versunken. Der österreichische Geologe Eduard Suess (1831-1914) ging in seiner Buchreihe „Das Antlitz der Erde“ (1882-1909) sogar davon aus, dass grosse Teile des heutigen Atlantiks einst eine solche Landbrücke gewesen sein müsse.

1.3 Das Schattendasein der Mobilisten und ihr Umweg über den Mond

Im Schatten des Fixismus, der nicht zuletzt durch die Landbrücken-Theorie zur allseits anerkannten Vorstellung der etablierten Wissenschaft wurde, entwickelte sich unter einigen wenigen Aussenseitern die Gegenströmung der **Mobilisten**, die davon ausgingen, dass sich die Kontinente in der Vergangenheit verschoben hatten und dass sie sich auch in der Zukunft verschieben würden. Der französische Geograf Elisée Reclus (1830-1905) war einer dieser Aussenseiter. Er war Anarchist und damit radikalen Ideen grundsätzlich zugeneigt. 1868 postulierte er in seinem Werk „La Terre, description des phénomènes de la vie du globe“⁶ die Existenz eines ehemaligen Grosskontinents, der beide Amerikas, Afrika, Indien und Neuseeland beinhaltete und später auseinander brach. Dabei berief er sich wie ein Jahr-

hundert zuvor schon Snider-Pellegrini auf Funde gleicher Fossilien dies- und jenseits der Ozeane, die mittlerweile bereits in grosser Menge dokumentiert worden waren.

Die Mobilisten standen jedoch vor dem Problem, dass sie keinen Antriebsmechanismus benennen konnten, welcher die Verschiebung der Kontinente hätte bewirken können. Dies benachteiligte sie gegenüber den Fixisten, denn die etablierte Lehrmeinung betrachtete es nicht als notwendig, im Gegenzug auch ihren Standpunkt belegen zu müssen. Wo es keine Bewegung gab, benötigte man folglich auch keine Erklärung für einen Antriebsmechanismus. Zusätzlich stand man auf der Seite der wissenschaftlichen und kirchlichen Tradition – und wer stellt schon Traditionen in Frage?

Die Suche nach Antriebsmechanismen nahm Umwege, die rückwirkend reichlich exotisch erscheinen. 1878 legte George Howard Darwin (1845-1912), der Sohn von Charles Darwin, mit seiner **Abspaltungstheorie** eine Erklärung für die Entstehung des Mondes vor. Demnach rotierte die Erde in ihrer Frühphase so schnell, dass sich durch Fliehkräfte ein Teil davon ablöste und den Mond bildete. Der Geologe Osmond Fisher (1817–1914) baute auf dieser Vorstellung auf und vertrat 1882 die Ansicht, der Pazifische Ozean beziehungsweise die landmassenlose Seite der Erde sei die, heute noch sichtbare Narbe dieser Abspaltung. Damit war zwar kein Antriebsmechanismus erklärt, immerhin jedoch gab es jetzt eine nicht-fixistische Erklärung für die Existenz des Pazifischen Ozeans.

Der amerikanische Amateurgeologe Frank Bursley Taylor (1860-1938) postulierte 1908, der Mond sei einst ein freier Himmelskörper gewesen, der erst zum Erdtrabanten wurde, nachdem er beim Vorbeiflug durch die Erdgravitation eingefangen worden war. Dabei soll der Mond der Erde so nahe gekommen sein, dass die Kontinente durch extrem grosse Gezeitenkräfte, welche heute in abgeschwächter Form „nur noch“ Ebbe und Flut verursachen, bis in ihre aktuelle Lage auseinander gezogen wurden.

Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit von Mond- und Erdgesteinen geht man heute davon aus, dass sich der Mond von der Erde abspaltete. Auslöser war vermutlich der Einschlag eines grossen Himmelskörpers vor ca. 4.5 Milliarden Jahren auf die junge Erde.

2 Ein Aussenseiter steckt das Haus in Brand

2.1 Alfred Wegener und die Kontinentalverschiebung

1912 hielt der deutsche Astronom, Physiker, Meteorologe und Polarforscher Alfred Wegener (1880-1930) vor der Deutschen Geologischen Vereinigung einen Vortrag mit dem Titel „Die Herausbildung der Grossformen der Erdrinde auf geophysikalischer Grundlage“, der die etablierte Wissenschaftswelt in Aufruhr versetzte. In der Einleitung zur ersten Veröffentlichung seiner Vorstellungen schreibt

⁵ Über die Entstehung der Arten.

⁶ Die Erde, Beschreibung der Phänomene des Lebens auf dem Globus.

Wegener: „Im folgenden soll ein erster Versuch gemacht werden, die Großformen der Erdrinde, d.h. die Kontinentaltafeln und die ozeanischen Becken, durch ein einziges umfassendes Prinzip zu deuten, nämlich das der horizontalen Beweglichkeit der Kontinentalschollen. Überall, wo wir bisher alte Landverbindungen in die Tiefe des Weltmeeres versinken ließen, wollen wir jetzt ein Abspalten und Abtreiben der Kontinentalschollen annehmen. Das Bild, welches wir so von der Natur unserer Erdrinde erhalten, ist ein neues [...], entbehrt aber nicht der physikalischen Begründung. Und andererseits enthüllt sich uns schon bei der hier versuchten vorläufigen Prüfung eine so große Zahl überraschender Vereinfachungen und Wechselbeziehungen, dass es mir nicht nur als berechtigt, sondern geradezu als notwendig erscheint, diese neue, leistungsfähigere Arbeitshypothese an Stelle der alten Hypothese der versunkenen Kontinente zu setzen, [...]. Trotz der breiten Grundlage möchte ich das neue Prinzip als Arbeitshypothese⁷ behandelt sehen, bis es gelungen sein wird, das Andauern dieser Horizontalverschiebungen exakt durch astronomische Ortsbestimmung nachzuweisen.“

1915 veröffentlichte Wegener sein Hauptwerk, 'Die Entstehung der Kontinente und Ozeane'. In den folgenden Jahren trug er weitere Belege zusammen und es folgten neue, umfangreichere Auflagen, die vierte und letzte im Jahr 1929. Mit seiner Hypothese, die heutigen Kontinente seien Bruchstücke eines grossen Urkontinentes, der in der Vergangenheit auseinander gebrochen sei (Abb 5), war Wegener nicht der Erste. Wie seine Vorgänger auch, machte er zunächst die Beobachtung, dass die Küstenlinien beidseits des südlichen Atlantiks erstaunlich genau zueinander passen. Was ihn jedoch von seinen Vordenkern abhebt, ist seine profunde Argumentation auf diversen, voneinander unabhängigen wissenschaftlichen Ebenen, die dem damaligen Stand des Wissens entsprachen. Sein Verdienst ist dabei nicht die geologische Forschung – diese konnte er aufgrund seiner Ausbildung gar nicht leisten – sondern das akribische Zusammentragen von Argumenten und die Schlüsse, die er daraus zog. Dies macht ihn zum unbestrittenen Begründer der **Theorie der Kontinentalverschiebung**.

Auf der Basis geologischer, paläontologischer und glaziologischer Befunde, die er grösstenteils der Fachliteratur entnahm, lieferte er zahlreiche plausible Gründe für die Existenz eines **Urkontinentes Pangaea** („ganze Erde“; pan = griech. alles, gaia = griech. Erde). Zusätzlich gelang es ihm mit ebenso plausiblen Argumenten, die Vorstellung von einer unaufhaltsam erkaltenden und erstarrenden Erde sowie die Landbrückentheorie zu widerlegen, auf de-

⁷ Die Hypothese ist die Vorstufe einer Theorie, zu der sie durch verifizierende Beobachtungen werden kann, vorausgesetzt es gelingt niemandem, sie eindeutig zu widerlegen. Der Ausdruck 'Theorie' bezeichnet eine Gruppe aufeinander bezogener logischer Aussagen, die zumindest teilweise empirisch bestätigt sind. Wegeners anfängliche Hypothese wurde zuletzt von ihm selbst als Theorie bezeichnet, da er sie durch unabhängige empirische Beobachtungen für genügend belegt hielt.

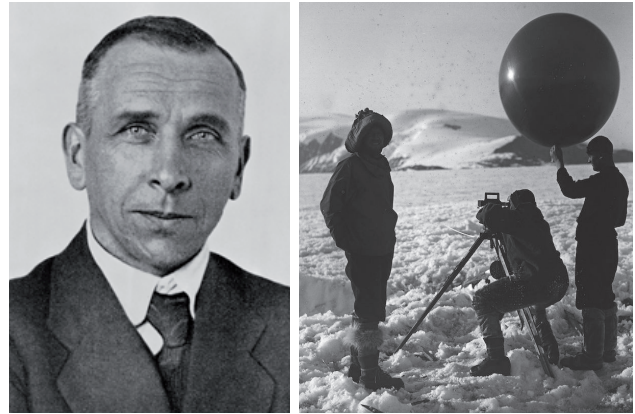


Abb. 4: Alfred Wegener, Portrait und beim Steigenlassen eines Wetterballons während einer seiner Expeditionen nach Grönland. Während seiner vierten Grönlandexpedition 1930 verstarb Alfred Wegener, vermutlich an Erschöpfung.

ren Basis bisher erklärt wurde, weshalb sich viele fossile und auch lebende Tiere und Pflanzen über die Grenzen der Kontinente hinweg gleichen, obwohl diese gemäss den Vorstellungen des Fixismus ihre Lage seit jeher nie verändert hatten und immer schon von den auch heute bekannten Ozeanen umgeben waren.

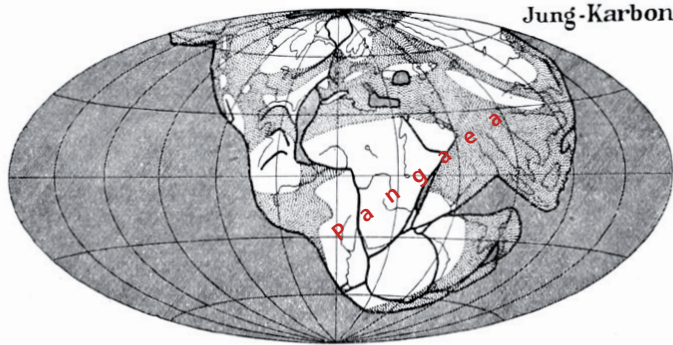
Damit legte Wegener zwar Feuer an das vorherrschende Weltbild der etablierten Geologen, der Brand dehnte sich jedoch nicht mit der zu erwartenden Geschwindigkeit aus und drohte nach seinem frühen Tod 1930 während einer Forschungsexpedition nach Grönland sogar zu erlöschen. Das lag zum einen daran, dass Wegener – wie er selbst einräumte – exakte Messungen als letzte, eindeutige Beweise für die Kontinentalverschiebung fehlten und er zeitlebens auch keine stichhaltige Erklärung für die Kräfte liefern konnte, welche die Kontinente in Bewegung versetzten. Es hatte aber letztlich vor allem damit zu tun, dass Wegener ein tief verankertes Weltbild über den Haufen werfen wollte. Wie konnte ein ungebetener Fremdling ohne geologische Ausbildung mit jugendlichem Mut und unbequemen Hypothesen in die wohl gehütete Domäne der etablierten Geologie eindringen, ohne sich nicht deren Vertreter – mehrheitlich ältere Herren – in grosser Zahl zum Feind zu machen?

2.1.1 Wegener widerlegt etablierte Meinungen

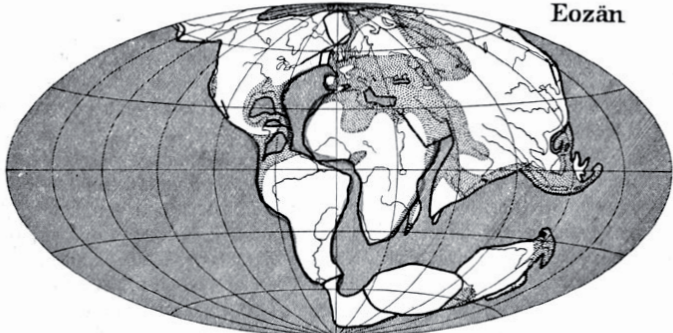
Radioaktivität heizt dem schrumpfenden Apfel ein

Die bisherige fixistische Vorstellung von der unveränderlichen Lage der Kontinente und Ozeane beruhte auf der Annahme, dass die Erde von aussen her unaufhaltsam erkaltete und erstarrte, dabei wie ein austrocknender Apfel zusammenschrumpfte und sich in Falten lege, wodurch auch das Aufwölben von Gebirgen und das Einsinken von Ozeanbecken erklärt wurde. Diese sogenannte **Kontraktions-theorie** (Abb. 6) wurde insbesondere von den zwei tonangebenden Alpengeologen Eduard Suess in Österreich und Albert Heim in der Schweiz vertreten. Wegener vermutete jedoch, dass der, 1896 von Henri Becquerel (1852-1908) entdeckte radioaktive Zerfall häufig vorkommender che-

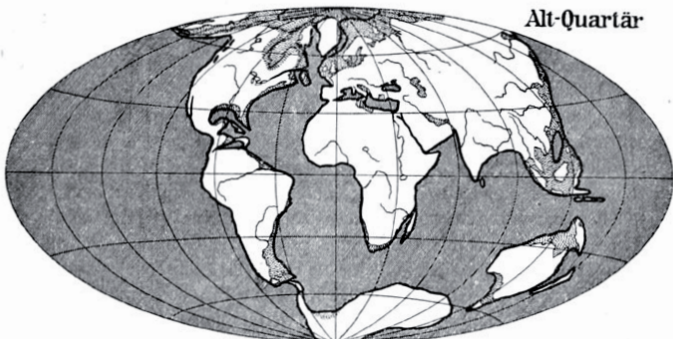
Jung-Karbon



Eozän



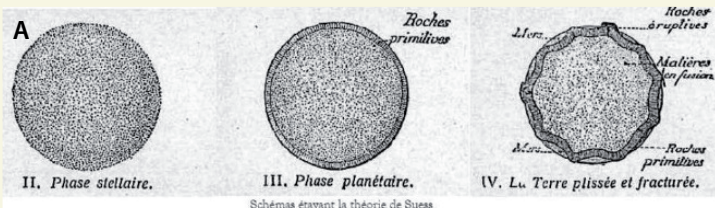
Alt-Quartär



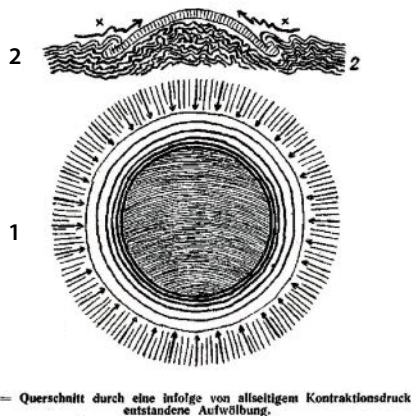
Rekonstruktionen der Erdkarte nach der Verschiebungstheorie für drei Zeiten.

Schraffiert: Tiefsee; punktiert: Flachsee; heutige Konturen und Flüsse nur zum Erkennen. Gradnetz willkürlich (das heutige von Afrika).

Abb. 5: Kontinentalverschiebung ausgehend von einem grossen Urkontinent, den Wegener Pangaea nannte. Die Erdzeit Jung-Karbon liegt ca. 300 Mio. Jahre zurück, das Eozän ca. 45 Mio. Jahre und das Alt-Quartär ca. 2 Mio. Jahre. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929.



B



2 = Querschnitt durch eine infolge von allseitigem Kontraktionsdruck entstandene Aufwölbung.

Abb. 6A: Kontraktionstheorie dargestellt 1925 in einem Schulbuch von V. Boulet, entsprechend den Vorstellungen von Eduard Suess. **6B:** Allgemeine Darstellung der Kontraktionstheorie (1) und deren Auswirkungen auf die Entstehung von Gebirgen (2). Von den Befürwortern der Kontraktionstheorie ist dazu keine detaillierte Darstellung überliefert, sodass hier eine Abbildung aus einer Publikation von Otto Ampferer von 1942, einem ihrer Gegner, wiedergegeben ist.

LA FORMATION DES ALPES OCCIDENTALES

Essai de reconstitution embryotectonique figurant les principaux stades du développement par EMILE ARGAND.

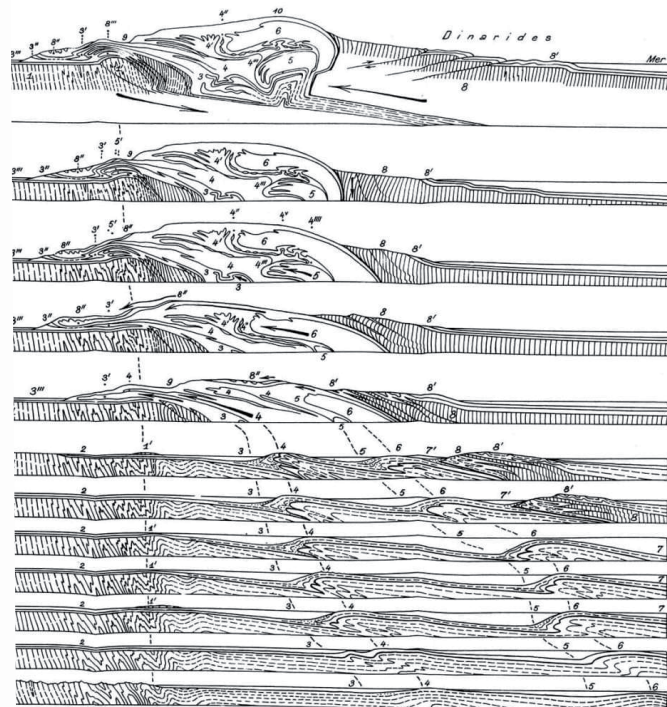
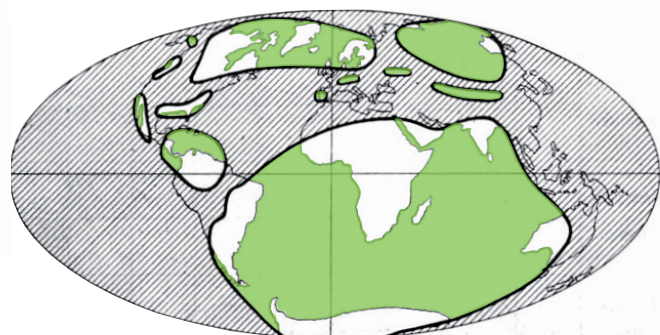


Abb. 7: Alpenbildung durch Überschiebung von grossen Gesteinspaketen, sogenannten Decken, gezeichnet 1916 von Emile Argand.



Verteilung von Wasser (schraffiert) und Land zur Karbonzeit nach den üblichen Vorstellungen.

■ Versunkene Teile der Landbrücken

Abb. 8: Um die Vorstellung fixer Kontinente in Einklang zu bringen mit dem Wissen, dass sich viele fossile und lebende Tiere und Pflanzen über die Grenzen der Kontinente hinweg gleichen, hätten alle schwarz umrandeten Gebiete Landbrücken sein müssen. Die grünen Gebiete hätten demnach im Lauf der Zeit versinken müssen, bis nur noch die heutigen Umrisse der Kontinente übrig geblieben wären (Landbrückentheorie). Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929, eingefärbt und ergänzt.

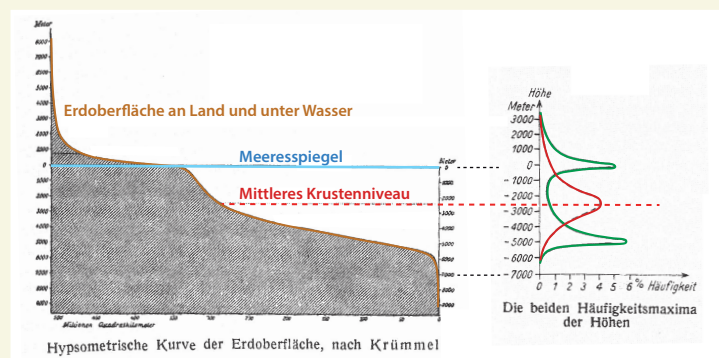


Abb. 9: Zwei Höhen kommen auf der Erdoberfläche am häufigsten vor: 100 m über Meeresspiegel und 4700 unter Meeresspiegel, dargestellt durch die grüne Kurve. Dies entspricht nicht jener Höhenverteilung, die zu erwarten wäre, wenn Ozeanböden und Kontinente nur Endzustände von aufsteigenden und absinkenden Landbrücken wären (rote Kurve). Die zwei Maximalwerte (grün), zeigen, dass es kaum Zwischenstadien in Form versinkender oder auftauchender Landbrücken gibt. Heute wissen wir, dass dies Ausdruck der sehr unterschiedlichen Dichten von ozeanischer und kontinentaler Kruste ist. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929, eingefärbt und ergänzt.

mischer Elemente genügend Wärme freisetze, um das Erdinnere nicht erkalten zu lassen. Heute ist bekannt, dass der Erdmantel mit etwa 0.1°C pro Jahrmillion abkühlt, wodurch sich die Asthenosphäre frühestens in 500 Mio. Jahren soweit versteifen wird, dass sich die Lithosphärenplatten nicht mehr bewegen können.

Zwei weitere Argumente sprachen aus Sicht Wegeners ebenfalls gegen die Kontraktionstheorie:

- Diverse Alpengeologen gingen davon aus, dass der Zusammenschub der Kruste bei Gebirgsbildungen vier bis acht mal der Breite des Gebirges entsprach. Eine derartige Verkürzung der Kruste liess sich mit einer blossen Schrumpfung durch Kontraktion nicht erklären. Ein Beispiel dafür ist die Rekonstruktion der Alpenfaltung durch den Schweizer Geologen Emile Argand (1889-1940) in Abb 7.
- Würde die Erde bloss schrumpfen, dürfte die Kruste keine Spuren des Auseinanderreissens aufweisen, wie man dies im Rheintal nördlich von Basel (Rheintalgraben) oder in Ostafrika (East African Rift) beobachten konnte.

Landbrücken können nicht versinken

Man hatte im Lauf des 19. Jahrhunderts bei geophysikalischen Schweremessungen entdeckt, dass Kontinente vorwiegend aus spezifisch leichterem Material, die Ozeanböden dagegen aus spezifisch schwererem Material bestehen. Doch selbst Eduard Suess, der für das leichte Material den Begriff „SiAl“ und für das Schwere den Begriff „SiMa“⁸ einführte, dachte dieses Konzept nicht zu Ende, denn sonst hätte er erkennen müssen, dass es der, auch von ihm vertretenen Theorie der versunkenen Landbrücken diametral widersprach.

Wegener hingegen verstand, dass die bisher angenommenen, aus dem weniger dichten SiAl bestehenden Landbrücken (Abb. 8) zwischen den Kontinenten genauso wenig in dem dichteren, darunter liegenden SiMa des Ozeanbodens versinken konnten wie ein Eisberg im Meer. Was Wegener ebenfalls stutzig machte: Um zu erklären, dass Landbrücken entstehen und wieder versinken konnten, müsste sich Ozeanboden in Kontinent verwandeln können und umgekehrt. Da man aber auf den Kontinenten nur sehr geringe Mengen von Gesteinen des Ozeanbodens fand, war dies unglaublich. Wenn es solche Umwandlungen gäbe, argumentierte Wegener, müsste sich auch das Höhenniveau des weitaus grössten Teils der Erdoberfläche irgendwo zwischen dem mittleren Höhenniveau des Ozeanbodens und jenem der Kontinente befinden. Dies war jedoch nicht so (Abb. 9). Und: wenn es in ge-

wissen Zeitabschnitten in Form der Landbrücken zusätzliche Landmasse gegenüber heute gab, hätte dann damals das verdrängte Ozeanwasser nicht die Kontinente grossflächig überfluten müssen? Dafür existierten jedoch keine geologischen Belege, ebenso wenig dafür, dass seither Ozeanwasser in entsprechender Menge verloren gegangen wäre.

Ein weiteres Argument gegen die Landbrückentheorie lieferten einige Jahre später die Echolotmessungen des Forschungsschiffes Meteor (Abb. 10) von 1924 bis 1927 im Atlantik. Diese damals noch junge Technologie, die hauptsächlich zu militärischen Zwecken entwickelt wurde, ermöglichte es zum ersten Mal, genauere Informationen über die Topographie des Meeresbodens zu sammeln. Anstatt von Ost nach West verlaufender, versunkener Landbrücken zwischen den Kontinenten wurde die Existenz eines von Nord nach Süd verlaufenden Gebirgszugs in der Mitte des Atlantiks bestätigt. Dieser sogenannte Mittelatlantische Rücken wird später für die Entstehung der Theorie der Plattentektonik eine zentrale Rolle spielen. Wo also waren die Überreste der Landbrücken heute, wenn sie wirklich jemals existiert hatten?

2.1.2 Belege für die Existenz von Pangaea

Gesteinsformationen als Zeugen

Wegener machte darauf aufmerksam, dass Gesteinsformationen in Nord- und Westafrika solchen in Südamerika gleichen und dass Indien, Madagaskar und Ostafrika geologische Ähnlichkeiten aufweisen, die nahe legen, dass diese Kontinente einst in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander gelegen haben müssen. Zudem kann ein Gebirgszug in Südafrika als Verlängerung eines entsprechend aufgebauten Gebirges in Argentinien verstanden werden. Uralte Gesteine in Skandinavien und Grönland entsprechen jenen in Nordamerika auf der gegenüberliegenden Seite des Atlantiks (heute Grenville-Orogenese genannt) und auch die (heute als Kaledonisch bekannten) Faltengebirge in Norwegen und Schottland setzen sich in den amerikanischen Appalachen fort (Abb. 11).

Klimazeugen

Als Meteorologe befasste sich Wegener bevorzugt mit der Klimageschichte der Erde. Sein Schwiegervater Vladimir Köppen war einer der führenden Klimatologen jener Zeit und Begründer des Köppen'schen Klimazonenkonzeptes. Auf diesem Gebiet sammelte Wegener denn auch einige seiner wichtigsten Argumente. In der Antarktis hatte man Kohlevorkommen entdeckt, die eigentlich nur unter tropischen Bedingungen entstehen können. Auf den arktischen Inseln von Spitzbergen fanden sich Überreste fossiler Bäume, die heute im Gebiet des Mittelmeers sowie der Tropen vorkommen. Wegener war auch schon klar, dass die Sahara einst zu grossen Teilen von Gletschern bedeckt gewesen sein musste. Heute wissen wir, dass sich Nordafrika vor ca. 460 Millionen Jahren in der Gegend des heutigen Südpols befand. All diese Spuren von

⁸ SiAl: Abkürzung für Silizium und Aluminium als Hauptbestandteile des leichten, kontinentalen Materials, z. B. des Granits. SiMa: Abkürzung für Silizium und Magnesium als Hauptbestandteile des schweren, ozeanischen Materials, z. B. des Basalts. Heute weiss man, dass diese Unterscheidung wenig sinnvoll ist. Die Begriffe sind überholt und sollten nicht mehr verwendet werden.

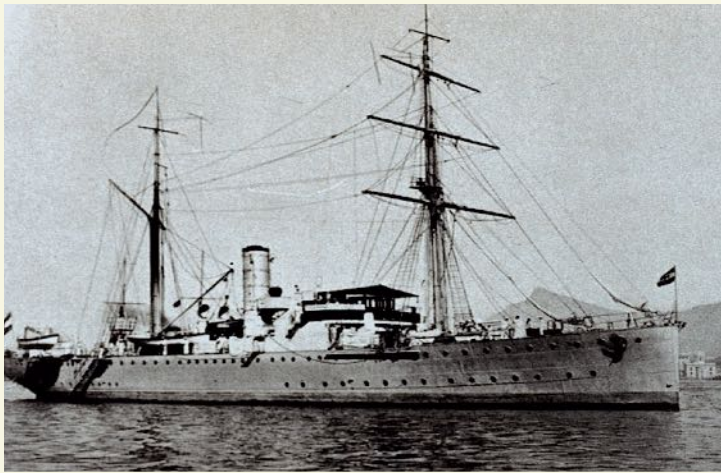
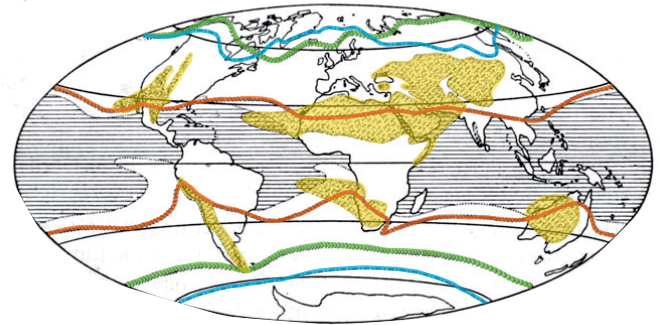


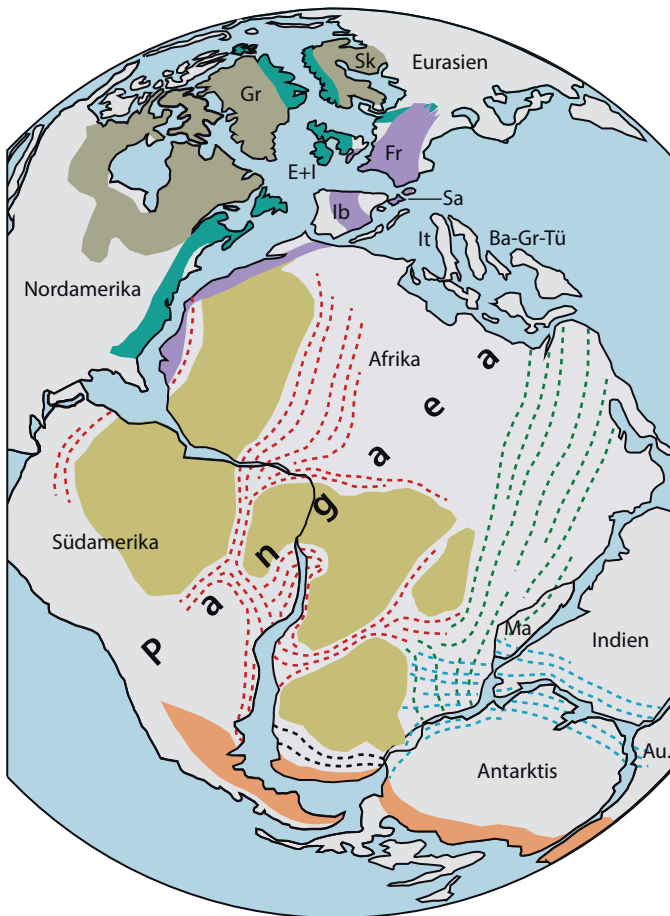
Abb. 10: Forschungsschiff Meteor. Aus: F. Spieß, Die Meteor-Fahrt. Forschungen und Erlebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition 1925-1927.



— Mitteltemperatur des Jahres -2° (Grenze des gefrorenen Bodens)
 — Mitteltemperatur des wärmsten Monats 10° (Baumgrenze)
 — Mitteltemperatur des kältesten Monats 18° (Tropen)
 — Temperatur der Wasseroberfläche im kältesten Monat mindestens 22°
 Trockengebiete einschließlich trockener Hochländer.

Heutige Hauptisothermen (im Meeresniveau) und Trockengebiete.

Abb. 12: Heutige Isothermen (Linien gleicher Temperatur) als Begrenzung von Permafrost, Waldwachstum und Tropen. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929, eingefärbt und ergänzt.

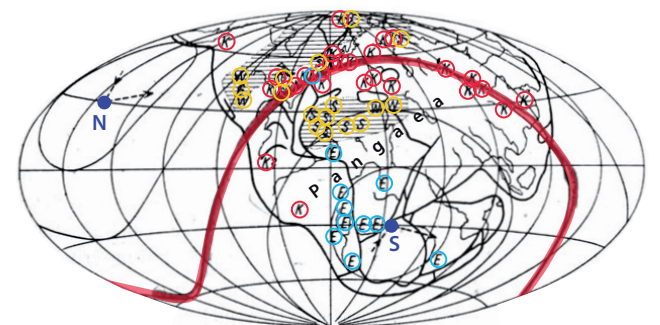


Obere Trias, ca 200 Mio J. vor heute

- Zusammen passende alte Gesteinseinheiten (Präkambrische Kratone/Schilde, älter als 1000 Mio. Jahre)
- Proterozoische Gebirge der Südkontinente (älter als 540 Mio J.)
- Paläozoische Gebirge der Südkontinente (jünger als 540 Mio J.)
- Kaledonisches Gebirge (ca. 450-420 Mio J.)
- Variszisches Gebirge (ca. 410-250 Mio J.)

Au: Australien, Ba-Gr-Tü: Balkan-Griechenland-Türkei, Fr: Frankreich, E+I: England + Irland, Gr: Grönland, Ib: Iberische Halbinsel, It: Italien, Ma: Madagaskar, Sa: Sardinien, Sk: Skandinavien.

Abb. 11: Gesteinseinheiten und Gebirge auf dem Urkontinent Pangaea, die über die Grenzen der Kontinente hinweg zusammenpassen. Leider ist aus keinem von Wegeners Arbeiten eine Abbildung des damaligen Wissensstandes überliefert. Die Abbildung ist eine Kompilation aus unterschiedlichen, aktuellen Quellen. Ob Wegener im Detail schon alles wusste, ist nicht bekannt. Grafik M. Wyss, 2018. Anordnung der Kontinente mod. nach undat. Grafik Institute for Geophysics, The University of Texas; Geologie der Südkontinente nach Gray et al, 2007; Geologie der Nordkontinente nach div. tektonischen Karten.



Eis, Moore und Wüsten im Karbon.
 (E) = Eisspuren; (K) = Kohlen; (S) = Salz; (G) = Gips; (W) = Wüstensandstein;
 schraffiert = Trockengebiete. Nach Köppen-Wegener.
 — Relative Lage des Äquators zu den damaligen Kontinenten
 S, N Relative Lage von Süd- und Nordpol zu den damaligen Kontinenten

Abb. 13: Spuren von Vergletscherung (arktisches Klima), Kohlevorkommen (hauptsächlich feuchttropisches Klima), Steinsalz, Gips und Wüstensandstein (arides Klima) auf dem Grosskontinent Pangaea zur Zeit des Karbon (ca. 350-300 Mio. Jahre vor heute). Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929, eingefärbt und ergänzt.

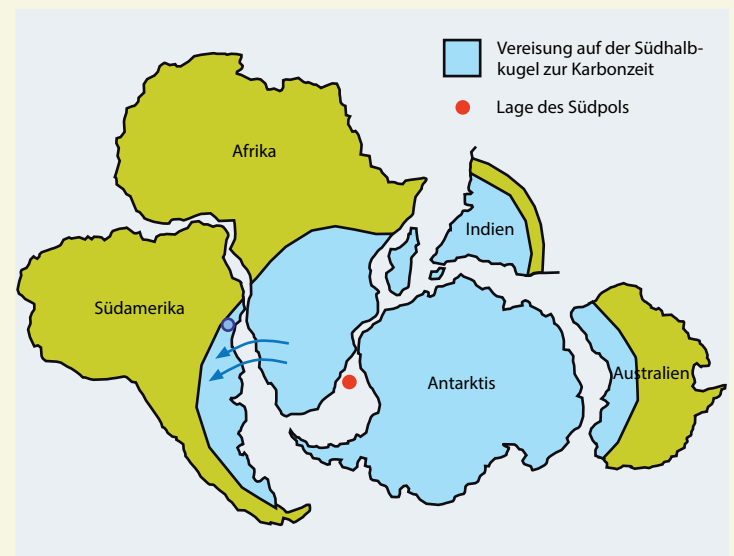


Abb. 14: Haben sich, wie von Wegener postuliert, zur Zeit des Karbon alle Südkontinente um den Südpol gruppiert, lassen sich die Vergletscherungsspuren als Zeugen der polaren Eiskappe erklären. Blauer Kreis: Fundort eines Zeugen der Vereisung in Brasilien, siehe Abb. 14, Pfeile: Nachgewiesene Fließrichtung des Eises von Afrika nach Südamerika. Grafik M. Wyss 2018.

einstigen Klimaten, die nicht mehr zum aktuellen Klima ihrer Fundorte passen, deutete Wegener als Beweis für die Verschiebung der Kontinente durch die unterschiedlichen Klimazonen der Erde.

Jüngere Spuren von Vereisungen, die heute über alle Südkontinente (Südamerika, Afrika, Indien, Australien) verstreut sind, verstand Wegener als Indiz dafür, dass diese einst in der Nähe des Südpols vereint und von dessen polarer Eiskappe bedeckt waren. Wollte man alle diese Gebiete in ihrer heutigen Lage unter einer Eiskappe verschwinden lassen, wäre dies nur unter der Annahme einer umfassenden Vereisung möglich, die ihre Spuren fast überall auf der Erdoberfläche hätte hinterlassen müssen, wofür es keine Belege gibt. Nach heutigem Wissensstand handelt es sich dabei um eine Vereisung, die vor ca. 300 Millionen Jahren in den Zeiten des Karbons und des Perms stattgefunden hatte. Grosse Kohlevorkommen aus jener Zeit, die heute in Europa, Asien und Nordamerika liegen, zeichnen hingegen die damaligen feuchttropischen, also äquatorialen Gebiete nach, Gips- und Salzablagerungen waren ehemals Trockengebiete (Abb. 12 bis 15).

Fossilien als Zeugen

Auf allen Südkontinenten wurden Fossilien des kälteliebenden, vermutlich baumförmigen Farns *Glossopteris* und damit vergesellschafteter Pflanzen (*Glossopteris*-Flora) gefunden, die vor ca. 300 bis 200 Mio. Jahren in der Perm- und Triaszeit existierten (Abb. 16, 17). Dies passt bestens ins Bild eines Grosskontinentes, dessen südliche Gebiete in Polnähe lagen.

Identische, fossile Überreste des etwa einen Meter langen, ca. 290 bis 280 Millionen Jahre alten Süswasserreptils *Mesosaurus* wurden nur im südlichen Afrika und in Südamerika gefunden. Auch dies verstand Wegener als starken Beleg für seine Theorie: Hätte *Mesosaurus* schwimmend den Südatlantik überwinden können, wäre er mit grosser Wahrscheinlichkeit auch auf anderen Kontinenten heimisch geworden. Da ausserhalb des südlichen Afrikas und Südamerikas jedoch keine weiteren Hinweise auf seine Existenz nachgewiesen werden konnten, müssen diese Gebiete zu Lebzeiten von *Mesosaurus* miteinander verbunden gewesen sein (Abb. 18, 19).

Evolution der Wirbeltiere

Die Evolution der Wirbeltiere und Landpflanzen zeigt auf den verschiedenen Kontinenten bis zum vermuteten Zeitpunkt des Auseinanderbrechens von Pangaea auffällige Ähnlichkeiten. Erst danach folgten die Organismengruppen unterschiedlich verlaufenden Entwicklungslinien, entweder durch Isolation oder aufgrund unterschiedlicher Umweltbedingungen auf den sich trennenden Kontinenten. Wegener zeigte dies am Beispiel von Regenwürmern und Gartenschnecken (Abb. 20, 21).

Die angebliche Wanderung der Pole

Gewisse Gesteine enthalten feinste magnetische Partikel, welche sich in Richtung des Erdmagnetfeldes einregeln

und dieses für immer messbar anzeigen, man nennt dies Paläomagnetismus. Aufgrund von Messungen an Gesteinen mit verschiedenem Alter hatte sich gezeigt, dass die Pole des Erdmagnetfeldes im Laufe geologischer Zeiträume scheinbar weit über die Kontinente gewandert sein mussten. Da jedoch die nachgezeichneten Wanderrouten der Pole für jeden Kontinent anders sind (Abb. 22), schloss Wegener, dass deren vermeintliche Verschiebung die Lage der Kontinente relativ zu den Polen zu verschiedenen Zeitpunkten in der Erdgeschichte darstellten. Tatsächlich verändert sich das Erdmagnetfeld ständig. Die Pole wandern, manchmal schneller, manchmal langsamer, das wusste Wegener. Diesen Effekt konnte er jedoch rechnerisch aus seinen Polwanderrouten eliminieren. Das Magnetfeld wechselt sogar periodisch seine Richtung, von Nord nach Süd und umgekehrt, dies fand man jedoch erst nach Wegeners Tod heraus.

2.1.3 Ansätze zu einer umfassenden Theorie

Wegener hatte nicht nur stichhaltige Argumente gegen Kontraktions- und Landbrückentheorie, sondern auch genügend Gründe, den einstigen Zusammenschluss heute getrennter Kontinente im Urkontinent Pangaea zu postulieren. Als Konsequenz mussten sich die Kontinente nach ihrer Trennung in ihre heutige Lage verschoben haben. Das Wissen zu den Eigenschaften jener Zonen unterhalb der Erdkruste, die für das Verständnis von Krustenbewegungen von Bedeutung gewesen wären, war zu Zeiten Wegeners jedoch noch diffus, weil die technischen Voraussetzungen zu deren Erforschung noch nicht existierten.

Wegener ging deshalb davon aus, dass die „leichten“ (also weniger dichten) Kontinente durch das „schwere“ (also dichtere) Material der Ozeanböden hindurch glitten oder pflügten, ähnlich wie Eisschollen im Wasser driften. Obwohl wir heute wissen, dass diese Vorstellung falsch ist, gelang es Wegener, seine Hypothese der Kontinentalverschiebung mit weiteren geowissenschaftlichen Phänomenen in Verbindung zu bringen, wodurch er in der universellen Anwendbarkeit seiner *Theorie der Kontinentalverschiebung* der modernen Plattentektonik in einigem recht nahe kam.

Neben dem Offensichtlichen, der Entstehung von Ozeanen, mutmasste er, dass die Verschiebung der Kontinente auch für die Entstehung von Gebirgen verantwortlich sein könnte. Er stellte sich vor, wie Kontinente bei Zusammenstössen Gesteine zusammen- und aufschieben. Dabei machte er sich vermutlich die Sicht von Alpengeologen zu eigen, womöglich auch jene des schweizer Geologen Emile Argand (1879-1940), der bereits 1916 in seinen Alpenprofilen mit Pfeilen markiert hat, wie der nördliche Kontinent unter den südlichen gleitet (Abb. 7, oberstes Profil).

Wegener wusste auch, dass unter den Alpen im Vergleich mit deren Umland besonders leichte Gesteine liegen (Abb. 23). Daraus schloss er, dass bei einer Gebirgsbildung leichte kontinentale Kruste nicht nur in die Höhe, sondern un-



Abb. 15: Vom Gletscher transportierter, ca. 20 cm grosser Stein in feinsandigen Gletschersedimenten. Itu, Brasilien (Lokalisierung siehe Abb. 13), Foto Eurico Zimbres, Wikimedia Commons.

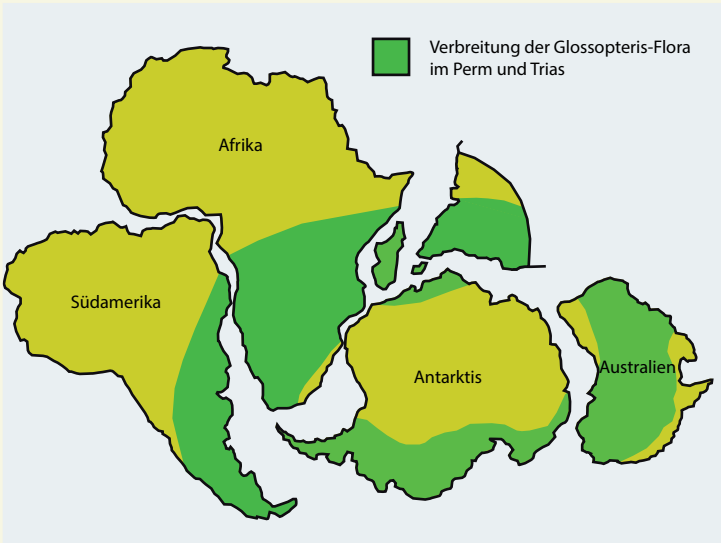


Abb. 16: Verbreitung der Glossopteris-Flora in der Perm- und Triaszeit (ca. 300-200 Mio. Jahre vor heute). Die Kälteliebenden Pflanzen lebten in einem Gürtel rund um das damalige Gebiet der Südpols. Grafik M. Wyss 2018, modifiziert nach Petter Boeckmann, Wikimedia Commons.



Abb. 17: Fossile Blätter von Glossopteris, ca. 4-6 cm lang, Foto Wikimedia Commons.

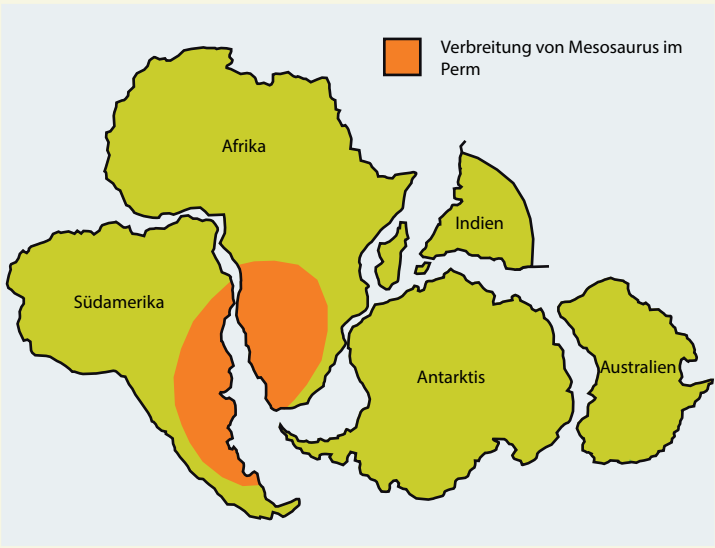


Abb. 18: Verbreitungsgebiet von Mesosaurus (290-280 Mio. J. vor heute) beidseits des Atlantiks in der Permzeit. Grafik M. Wyss 2018.



Abb. 19: Mesosaurus brasiliensis, Gesamtlänge ca. 60 cm, Foto Fossilmall.com.

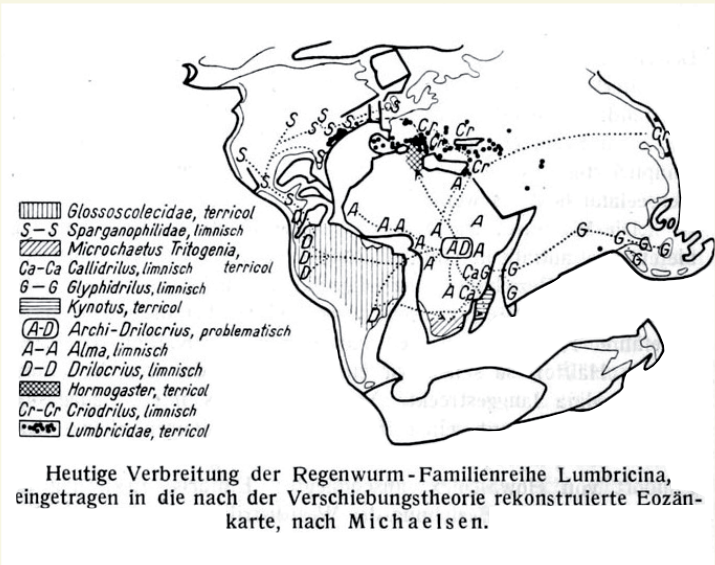


Abb. 20: Heutige Ausbreitung der Regenwürmer der Familie Lumbricina, ausgehend von Zentralafrika. Die Karte stellt die Situation im Eozän dar, ca. 40 Mio. Jahre vor heute. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929.

ter dem Gebirge auch in die Tiefe gepresst wird. Diesen Vorgang werden wir in Modul 5 verstehen lernen. Den Mittelatlantischen Rücken interpretierte er korrekt als jenen Ort, an dem aus aufdringendem Magma neuer Ozeanboden entsteht. Daraus schloss er, dass der Wärmefluss im Ozeanboden viel grösser sein musste als in den Kontinenten, da der Ozeanboden jung und noch nicht abgekühlt war. Diese Vermutung wurde zu Beginn der 1960-er Jahre mittels Messungen bestätigt.

2.2 Ablehnung und halberzige Erklärungsversuche

Nachdem Wegener eine derart erdrückende Menge von Argumenten gegen die alten Vorstellungen und für die Kontinentalverschiebung vorgebracht hatte, hätte es zumindest zu einer fairen, vertieften Debatte kommen müssen. Wegener fand jedoch kaum Gehör und stiess in breiten Kreisen auf strikte Ablehnung. Diese wurde damit begründet, er könne weder erklären, welche Kraft die Kontinentalverschiebung bewirken solle, noch nachweisen, dass sich die Kontinente aktuell auch bewegten. Zu Zeiten Wegeners erlaubte der Stand der Wissenschaft zu ersterem im besten Fall Vermutungen, letzteres wurde erst Jahrzehnte später auf zuverlässige Weise möglich.

Obwohl es ihn selbst kaum überzeugt haben dürfte, nannte Wegener die Gezeitenkraft des Mondes oder Fliehkräfte durch die Erdrotation ("Polfluchtkraft") als Antrieb für die Kontinentalbewegungen, wobei ihm seine Gegner zu Recht nachwiesen, dass diese viel zu schwach wären. Mehrmals erwähnte Wegener auch „zufällige Strömungen im Erdkörper“ als Antriebsmechanismus, womit er der modernen Vorstellung nahe gekommen wäre, hätte er mit „Erdkörper“ das gemeint, was wir heute als Erdmantel verstehen. Es ist allerdings unklar, was er wirklich damit meinte.

Viele Gegner misstrauten nicht nur Wegeners Erklärungsversuchen, sie zogen Wegeners ganze Argumentation bestenfalls in Zweifel, schlimmstenfalls durch den Dreck. Wie viele seiner Kollegen folgerte darum auch der britische Geophysiker Harold Jeffreys (1891-1989): „*Continental drift is out of the question!*“. Wissenschaftlich korrekt ist dieses Vorgehen nicht, denn es gibt in der Geschichte der Wissenschaft diverse Beispiele von revolutionären Vorstellungen, die bereits auf der Basis von Beobachtungen und ohne Kenntnis der Ursachen akzeptiert wurden. Darwins Evolutionstheorie von 1859 z. B. wurde in breiten Kreisen akzeptiert, obwohl es noch weitere hundert Jahre dauern sollte, bis die Mechanismen der Vererbung mit modernen Methoden erforscht werden konnten. In seiner Verbitterung soll Wegener gesagt haben, mit der gleichen Logik könne man auch die Existenz des Universums in Zweifel ziehen, denn dessen Ursache könne auch niemand schlüssig erklären.

Pierre-Marie Termier (1859-1930), Direktor des französischen Amtes für geologische Landesaufnahme liess sich immerhin folgende, halbwegs freundliche Aussage ent-

locken: „*Seine Theorie ist ein wundervoller Traum der Schönheit und Anmut, der Traum eines großen Poeten.*“

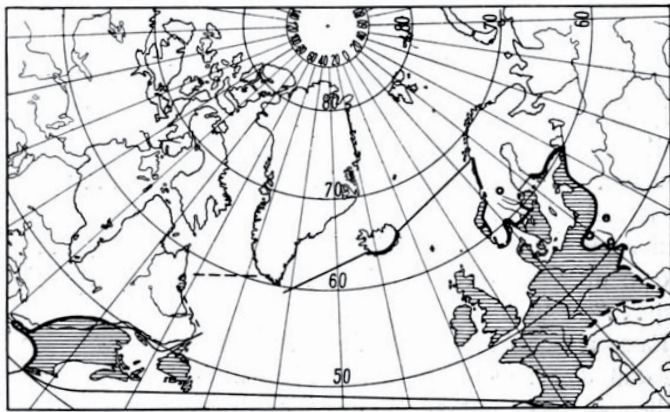
Den erbittertsten Gegner hatte Wegener in der Person des erkonservativen Amerikaners Rolin Thomas Chamberlin (1891-1948), der diese Rolle bereits von seinem Vater, Thomas Crowder Chamberlin geerbt hatte. Vater wie Sohn Chamberlin waren Herausgeber der einflussreichen amerikanischen Fachzeitschrift „*Journal of Geology*“. Diese Position nutzten sie schamlos aus, sodass sich kaum ein Geologe traute, gegen die Ansichten der Chamberlins Stellung zu beziehen, zu gross war die Furcht, ihre Arbeiten würden nicht mehr im *Journal of Geology* veröffentlicht. Dies hatte die Macht, Forscherkarrieren zu zerstören. Anlässlich einer wissenschaftlichen Konferenz 1926 zerriß Chamberlin Wegeners Theorie der Kontinentaldrift mit deutlichen Worten, wobei er sehr allgemein blieb, ohne Wegeners Argumente sachlich zu widerlegen: „*It does not fit the generally accepted record of geological time (...). Geological evidence does not show that a great continental mass split apart.*“ Um sicher zu sein, dass seine ablehnende Haltung auch deutlich als solche verstanden wurde, fügte er bei: „*It takes considerable liberty with our globe, and is less bound by restrictions or tied down by awkward, ugly facts than most of its rival theories. Its appeal seems to lie in the fact that it plays a game in which there are few restrictive rules and no sharply drawn code of conduct.*“ Später, 1928, zitierte Chamberlin einen nicht namentlich genannten Kollegen: „*If we are to believe Wegener's hypothesis, we must forget everything which has been learned in the last 70 years and start all over again.*“ Seine Worte hatten enormes Gewicht und warfen die geologische Forschung um Jahrzehnte zurück. Vor allem aber verhinderten sie eine faire und offene Diskussion. Es dürfte deshalb kein Zufall sein, dass sich die Debatte um die Kontinentalverschiebung erst nach Chamberlins Tod 1948 versachlichte und breiter geführt werden konnte.

2.3 Unterstützer auf verlorenem Posten

Aufgrund der unüberwindbaren Widersprüche, die Wegener aufgezeigt hatte, und trotz aller Versuche weiter Kreise, an den traditionellen Vorstellungen festzuhalten, wuchs die Unzufriedenheit mit der Kontraktions- und Landbrückentheorie auch bei anderen Wissenschaftlern. 1925 legte der österreichische Geologe Otto Ampferer (1875-1947) seine Arbeit „Über Kontinentalverschiebung“ vor, die das erste Modell einer von Konvektionsströmen im Erdinneren angetriebenen Kontinentalverschiebung enthielt. Diese Idee vertrat auch sein Landsmann und Geologe Robert Schwiner (1878-1953), der wie Wegener an der Universität Graz lehrte. Wegener ging jedoch kaum auf dessen Unterstützung ein, die Gründe dafür sind nicht bekannt.

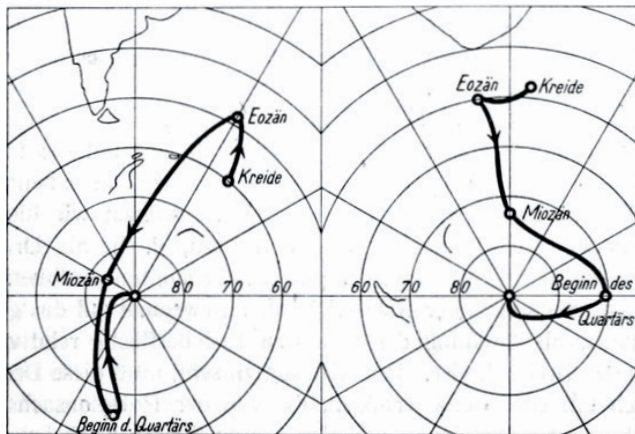
Auch der Brite Arthur Holmes (1890-1965) benannte 1931 – ein Jahr nach dem Tod Wegeners – in seinem Artikel „*Radioactivity and Earth Movements*“⁹ die Konvektionsströ-

⁹ Radioaktivität und die Bewegung der Erde



Genauere Verbreitung der Gartenschnecke, nach Ökland.

Abb. 21: Heutige Verbreitung der Gartenschnecke beidseits des Atlantiks. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929.



Wanderung des Südpols seit der Kreide; links bezogen auf Südamerika, rechts bezogen auf Afrika.

Abb. 22: Wanderung des Südpols von der Kreidezeit (ca. 100 Mio. Jahre) bis heute. Da die Wege in Südamerika und Afrika völlig anders aussehen, kann es sich nicht um eine effektive Verschiebung des Pols handeln, vielmehr verschoben sich die Kontinente auf verschiedenen Wegen relativ zu einem als fix angenommenen Pol. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929.

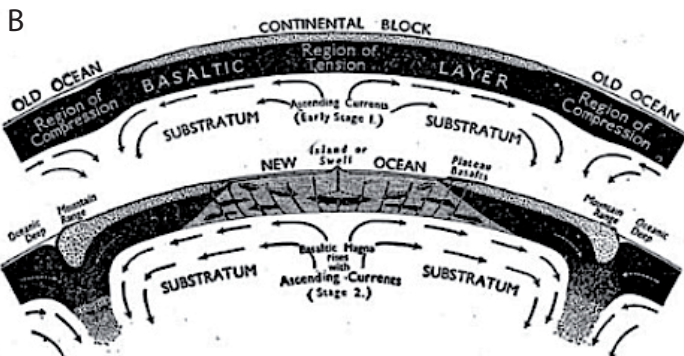
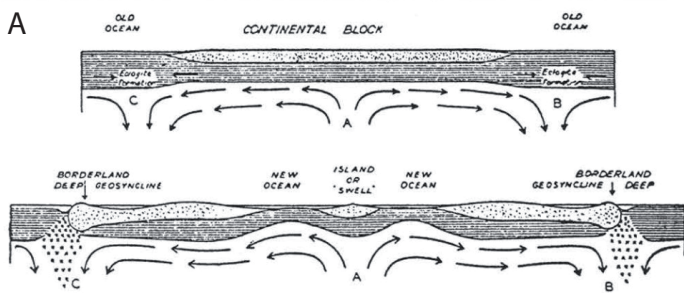
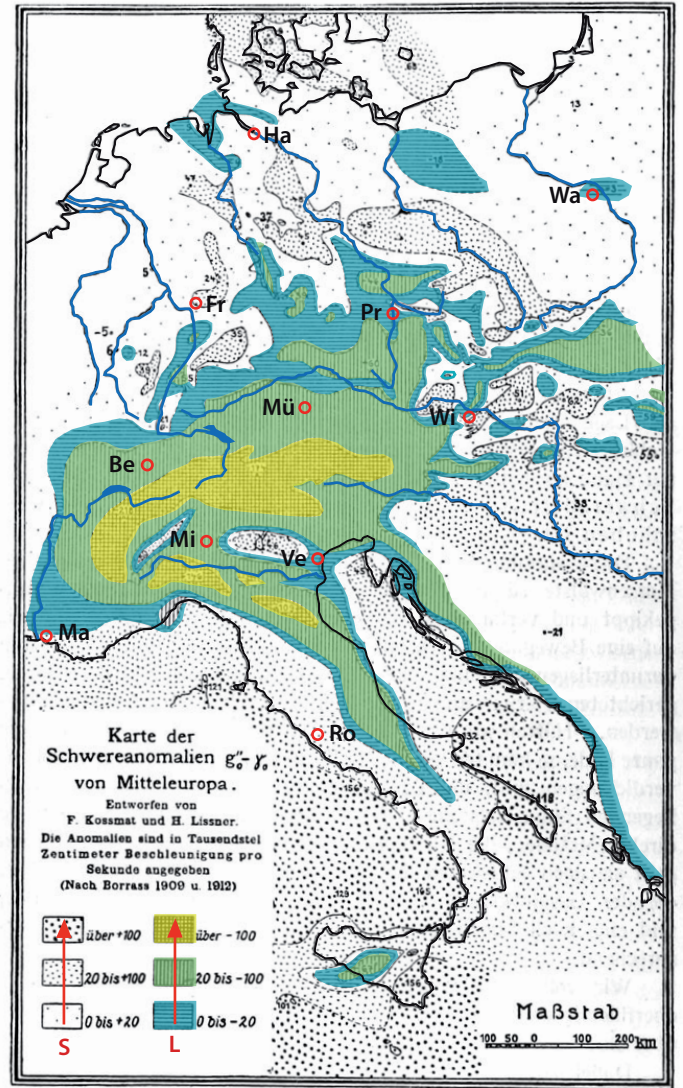
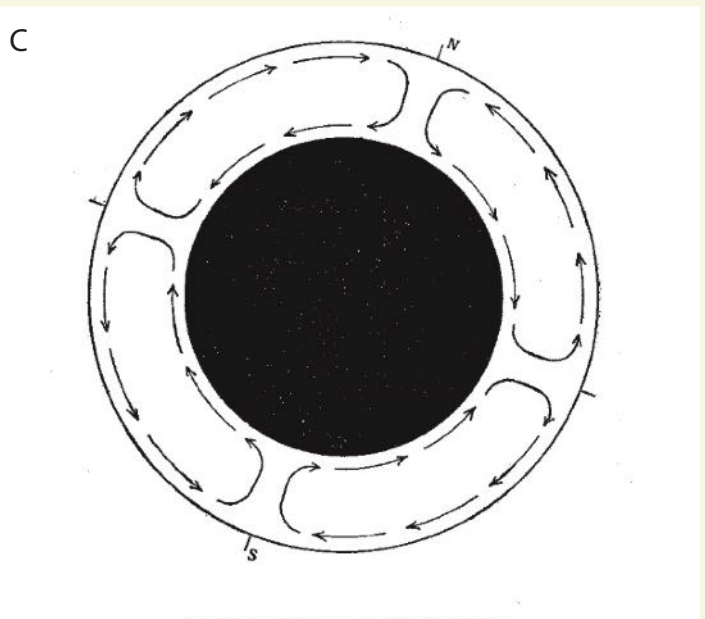


Abb. 24: Arthur Holmes Vorstellung von Konvektionsströmungen im Erdinneren, welche die Kontinentalverschiebung bewirken. In seinem Artikel 'Radioactivity and Earth Movements' von 1931 zeichnete er ein noch recht diffuses Bild (23 A). Es ist z.B. nicht klar, was mit 'Island or Swell' gemeint ist. Eventuell handelt es sich um Island oder die Azoren, die direkt auf dem Mittelatlantischen Rücken sitzen. Eine etwas klarere Vorstellung publizierte er 1944 in den 'Principles of Physical Geology', wo die auseinander geschobenen Kontinente inkl. der darunter liegenden 'basaltischen Schicht' - heute wäre das der Obere Mantel - seitlich wieder in die Tiefe absinken (23 B). Heute wissen wir allerdings, dass kontinentale Kruste nie unter ozeanische Kruste versinkt. 23C ist eine schematische, nicht massstäbliche Darstellung der Konvektionsströmungen.



Schwerestörung unter den Gebirgen Mitteleuropas, nach Kossmat.

Abb. 23: Karte der Alpen und angrenzender Gebiete mit Angaben zu Abweichungen (Anomalien) der Schwerkraft gegenüber dem Normalwert. Gebiete mit negativer Schwereanomalie weisen ungewöhnlich viel leichtes Gestein im Untergrund auf, Gebiete mit positiver Anomalie haben im Gegensatz dazu einen zu geringen Anteil an leichtem Material. S: schwer, d.h. zunehmend positive Anomalien; L: leicht, d.h. zunehmend negative Anomalien. Aus: A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1929, eingefärbt und ergänzt.



me im Erdinneren als Motor der Kontinentalverschiebung (Abb. 24A und C). Er nahm an, dass die nötige Hitze dafür durch radioaktiven Zerfall entstehe. Ging Wegener noch davon aus, dass die leichte kontinentale Materie auf der schweren ozeanischen „schwamm“, wusste Holmes 1944 aufgrund von Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen bereits, dass sich sowohl unter der ozeanischen wie auch unter der kontinentalen Kruste ein fester Teil des Mantels befindet, der zusammen mit der Kruste eine starre Schicht bildet, die wir heute Lithosphäre nennen (Abb. 24B). Das Material unterhalb der Lithosphäre – heute als Asthenosphäre bekannt – wurde als so zähflüssig angenommen, dass genügend Reibung mit der Lithosphäre bestand, um diese auf den Konvektionsströmungen wie ein Floss mitzuziehen. Von der Vorstellung eines vollständig flüssigen Erdinneren im Sinne Benjamin Franklins hatte man damals bereits Abstand genommen.

Der holländische Geophysiker Felix Andries Vening-Meinesz (1887-1966) hielt ebenfalls Konvektionsströme im Erdmantel für imstande, Kontinente zu zerbrechen und deren Bruchstücke auseinander zu treiben. Im Gegensatz zu Wegener, Ampferer, Schwinner und Holmes war er allerdings der Ansicht, es handle sich bei der Kontinentaldrift um einmalige, vergangene Ereignisse. An aktuelle Verschiebungen glaubte er nicht.

Alle diese Forscher präsentierten plausible Erklärungen für die Kontinentalverschiebung, oder zumindest solche, die eine Diskussion hätten auslösen sollen. Alle hatten sie auch detaillierte Vorstellungen von den Bewegungen der Kontinente. Sie brachten diese auch in Zusammenhang mit der Entstehung von Gebirgen und Tiefseegräben und postulierten, dass dort Gesteinsmaterial wieder in die Tiefe sinke und verschluckt werde. Nachdem das deutsche Forschungsschiff Meteor von 1924 bis 1927 Echolotkartierungen im Atlantik durchgeführt hatte, die erstmals eine konkrete Vorstellung des Mittelatlantischen Rückens vermittelten, war sich Ampferer 1941 sogar sicher, jenen Ort gefunden zu haben, wo neuer Ozeanboden gebildet wird. Sie alle konnten sich jedoch, wie schon vor Ihnen Wegener, nicht durchsetzen.

Einen anderen Weg beschritt der südafrikanische Geologe Alexander du Toit (1878-1948). Er konzentrierte sich ganz auf die Suche nach Beweisen, dass die Kontinentalverschiebungen tatsächlich stattgefunden hatten und konnte solche 1937 in seinem Buch *Our Wandering Continents: an Hypothesis of Continental Drifting*¹⁰ für Afrika und Südamerika in noch nie dagewesener Fülle und Präzision vorlegen. Er konnte zeigen, dass die gesamte geologische Schichtenabfolge an den gegenüberliegenden Küsten für einen Zeitraum von etwa 300 Millionen Jahren dieselbe war. Nicht nur die Fossilien waren dieselben, es waren auch die gleichen Gesteine gebildet worden, durch identische Prozesse und in derselben zeitlichen Reihen-

folge. Das hätte nicht funktionieren können, wenn die Gebiete durch einen Ozean getrennt tausende von Kilometern auseinander gelegen hätten.

2.4 Unentschlossene Alpengeologen

Die Alpen waren schon zu Zeiten Wegeners das am besten untersuchte Gebirge weltweit und galten als Massstab für die geologische Erforschung von Gebirgen. Zu Beginn wurde Wegeners Kontinentalverschiebung von etlichen Alpengeologen und insbesondere von den beiden führenden schweizer Geologen Émile Argand (1879-1940) und Rudolf Staub (1890-1961), die sich zum Mobilismus bekannten, positiv aufgenommen. Sie sahen sich in ihrer Vermutung bestätigt, dass viele Kilometer weit überschobene und übereinander gestapelte Gesteinspakete – die sogenannten Decken – wie sie in den Alpen beobachtet wurden (Abb. 7), nur durch die Kollision kontinentaler Platten erklärbar waren.

Emile Argand publizierte bereits 1922 eine Karte, welche eine detaillierte Vorstellung von der Lage der Südkontinente vor dem Auseinanderbrechen Pangaeas vermittelt (Abb. 25). In Rudolf Staub hätte Wegener einen Unterstützer – und auch Bewunderer – mit den besten Argumenten gehabt, war dieser doch ein profunder Kenner der Gebirge weltweit und auf der Suche nach einer allumfassenden Theorie für die Gebirgsbildung. In seinem Buch *Der Bewegungsmechanismus der Erde* von 1928 erteilte Staub der Kontraktionstheorie eine klare Absage und erklärte die Bildung der jungen Gebirge weltweit (z. B. Alpen, Anden, Himalaya) mit Wegeners Kontinentalverschiebung (Abb. 26). Die Bewegungen der Kontinente, vermutete er wie Wegener, seien das Resultat von Fliehkräften in Richtung Äquator (Polfluchtkraft) sowie der Anziehungskraft des Mondes, welche die, angeblich auf dem ozeanischen SiMa schwimmenden kontinentalen Blöcke aus SiAl (vgl. Fussnote 8 auf S. 6) zu bewegen vermochten. Weshalb es Staub und Argand nicht gelang, sich auf internationaler Ebene genügend Gehör zu verschaffen und weshalb ihre Arbeiten offenbar auch von Wegener kaum beachtet wurden, ist im nachhinein nicht nachvollziehbar.

In der Folge verstrickte sich die Alpenforschung immer tiefer in kleinkrämerische Detailfragen und riskierte damit, auf internationaler Ebene als nicht relevant für die Beantwortung „grosser Fragen“ wahrgenommen zu werden. Viele Alpengeologen wandten sich in den 1940-er und 1950-er Jahren von der Kontinentalverschiebung ab. Hatten sie plötzlich Angst vor ihrem eigenen Mut? Vielleicht hatten sie letztlich einfach zu grosse Zweifel, weil die Kontinentalverschiebung nach damaligem Wissensstand nicht in der Lage war, zu erklären, weshalb es neben den jungen Gebirgen auch unzählige alte und uralte Gebirge gab. Das Konzept der Wilson-Zyklen war damals noch in weiter Ferne.

Rudolf Trümpy (1921-2009), Professor an der ETH Zürich und jener schweizer Geologe mit der wohl grössten inter-

¹⁰ Unsere wandernden Kontinente: Eine Hypothese der Kontinentaldrift



Abb. 25: Position der Südkontinente als Teil von Pangaea bevor sie auseinander driften. Aus: É. Argand, La tectonique de l'Asie, 1922.

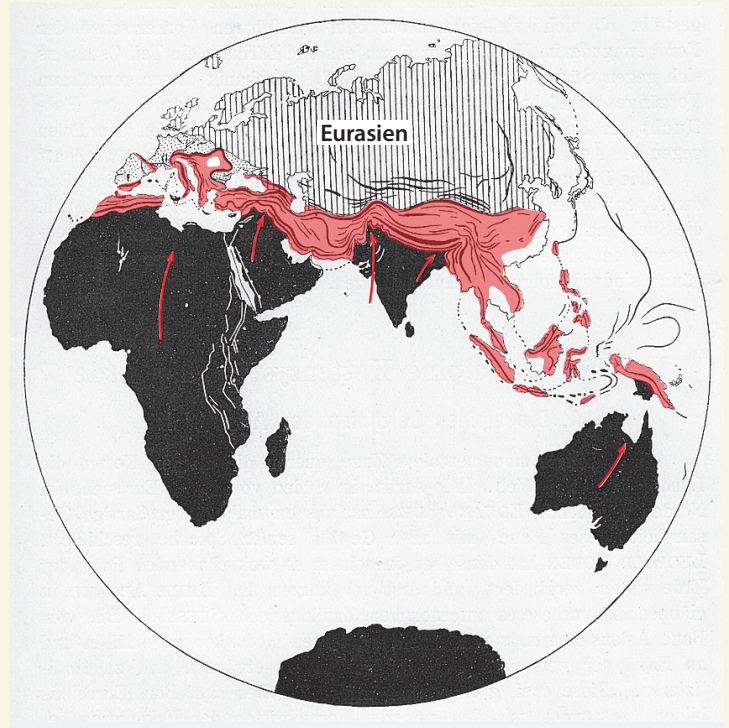


Abb. 26: Die Nordbewegung Afrikas, Indiens und Australiens als Auslöser für die Entstehung der Eurasischen Gebirge (rot). Aus R. Staub, Der Bewegungsmechanismus der Erde, 1928, eingefärbt und ergänzt. Vgl. auch Modul 5, Abb. 1, 2.

nationalen Ausstrahlung in jüngster Zeit, war ein Zeitzeuge der Querelen um die Plattentektonik. Mit spitzer Feder drückte er es 2001 folgendermassen aus: Die schweizer Geologen seien zu wenig mutig gewesen und hätten darin versagt, die plattentektonische Bedeutung ihrer eigenen Beobachtungen zu verstehen und international zu präsentieren. Trümpy räumt jedoch ein, selbst auch nicht zu jenen Forschern gehört zu haben, welche die Plattentektonik von Anfang an bereitwillig zu akzeptieren bereit waren. Er erzählt die Episode, wie ihm Tuzo Wilson, der Begründer der Wilson-Zyklen, 1948 mit breitem Lachen erklärt habe, die Kontinentaldrift sei bloss eine Modeerscheinung, physikalisch jedoch absolut unmöglich.

3 Expansion statt Kontraktion – oder doch eher Pulsation?

Die Fakten, die gegen die Kontraktionstheorie sprachen, verschwanden nicht, nur weil man die Arbeiten von Ampferer, Schwinner, Holmes oder du Toit genauso ablehnte wie jene von Wegener. Wer Anhänger der alten Vorstellung fixer Kontinente bleiben wollte, musste deren Widersprüche kleinreden, hinnehmen oder ignorieren. Für jene, die dazu nicht bereit waren, die gleichzeitig jedoch damit haderten, dass keine befriedigende Erklärung für die Ursache der Kontinentalverschiebung existierte, war ein Kompromiss zwischen Fixismus und Mobilismus verlockend: die **Expansionstheorie** (Abb. 27).

Schon 1859 spekulierte der englische Astronom und Spiritualist Alfred Wilks Drayson (1827–1901) in seinem Werk 'The Earth We Inhabit: its past, present, and probable future'¹¹ die Erde könnte sich im Lauf der Zeit ausgedehnt haben.

In zwei Arbeiten 1899 und 1909 nahm der italienische Geologe und Violinist Roberto Mantovani (1854–1933) diese Idee wieder auf und machte darauf aufmerksam, dass sich die Kontinente beinahe lückenlos zusammenfügen liessen, wenn man von einer ursprünglich viel kleineren Erde ausginge. Er postulierte, die Kontinente hätten zunächst die ganze Oberfläche dieser kleinen Erde bedeckt, die Ozeanbecken dazwischen seien erst entstanden, als sich die Erde auszudehnen begann.

Die Expansionstheorie schien einen gangbaren Ausweg zu bieten: mit ihr war es nicht notwendig, treibende Kräfte für die Bewegung der Kontinente zu benennen, gleichzeitig war sie vereinbar mit all jenen Beobachtungen, die frühe Verbindungen zwischen den Kontinenten unumgänglich machten. Nicht zufällig also erlangte sie zu jener Zeit ihre grösste Bekanntheit, als Alternativen sowohl zum Fixismus wie auch zu Wegeners Kontinentalverschiebung als notwendig erachtet wurden.

1935 schlug der südafrikanische Astronom Jakob Halm (1866–1944) die Erdexpansion als Erklärung vor, weshalb

¹¹ Die Welt in der wir leben: Ihre Vergangenheit, Gegenwart und wahrscheinliche Zukunft

sich das Leben in seiner Frühzeit ausschliesslich im Meer entwickelt hatte: Die Ozeane bedeckten demnach das ganze Land, weil die Erde zu klein war, um den Ozeanen genügend Raum zu bieten. Der ungarische Geophysiker Laszlo Egyed (1914-1970) betrachtete 1956 die seither entdeckten Schelfmeere – von Flachmeeren bedeckte Teile von Kontinenten wie z. B. die Nordsee – als Überreste dieser einstigen Überflutung. Er erklärte die unterschiedliche Zusammensetzung von Kontinenten und Ozeanböden, das SiAl und SiMa von Eduard Suess, damit, dass die Kontinente die urtümliche Kruste darstellten, die sich bei der Entstehung der Erde bildete. Ozeanböden dagegen seien Zwischenräume in der später aufgerissenen Ur-Kruste, die mit schwererem Material aus darunter liegenden Schichten aufgefüllt wurden.

Auch wenn es also durchaus Argumente für die Expansionstheorie gab, war die Ausdehnung der Erde mindestens ebenso schwierig zu erklären wie Wegeners Kontinentalverschiebung und die Wissenschaftler überboten sich in ihrer Kreativität. Der deutsche Physiker Ott Christoph Hilgenberg (1896-1967) vertrat in seinem Buch ‚Vom wachsenden Erdball‘ (1933) die Ansicht, Planeten zögen einen allgegenwärtigen, das Universum ausfüllenden Stoff – Äther genannt – an und absorbierten ihn, wobei sie an Masse zunahmen. Dadurch müsse sich die Erde auch in ihrem Volumen ausgedehnt haben. Der britische Physiker und Nobelpreisträger Paul Dirac (1902-1984) hatte dagegen 1938 die Vermutung geäussert, dass die Gravitationskonstante¹¹ mit der Zeit schwächer werden könnte, wodurch sich alle Körper im Universum ausdehnen. Seit den 1950-er Jahren war auch der australische Geologe Samuel Warren Carey (1911-2002) ein Verfechter der Expansionstheorie. Ihm zufolge bestand die gesamte Erde aus superdichtem Material, das nur bei tiefer Temperatur und hohem Druck stabil bleibt. Die Erde sei ursprünglich kalt gewesen und hätte sich erst durch den radioaktiven Zerfall gewisser Elemente aufgeheizt, wobei sich das superdichte Material zuerst an der Oberfläche, später auch in der Tiefe ausgedehnt hätte. Dies führte schliesslich zu einer Volumenzunahme der ganzen Erde. Egyed berechnete ein jährliches Wachstum des Erdradius von 0.5mm, Hilgenberg gab dieses 1965 mit 4mm pro Jahr an.

Für Arthur Holmes gab es neben der Kontraktions- und der Expansionstheorie noch eine weitere Möglichkeit, die **Pulsation**. Dabei ziehe sich die Erde periodisch zusammen und dehne sich wieder aus. Damit sollte sowohl die Entstehung von expansiven Riftsystemen, wie der Ostafrikanische Graben als auch die Entstehung von kontraktiven Gebirgen wie die Alpen erklärt werden können. Holmes wollte auch seine Konvektionsströme (Abb. 24) nicht als konstant, sondern als pulsierend verstanden wissen.

¹¹ Die Gravitationskonstante ist die fundamentale Naturkonstante, welche die Stärke der Gravitation (Anziehung) bestimmt. Laut Gravitationsgesetz nach Isaac Newton ergibt sich daraus direkt die Stärke der Gravitationskraft (Anziehungskraft) zwischen zwei Körpern in Abhängigkeit von deren Abstand und Massen.



Abb. 27: Modelle der expandierenden Erde aus Hilgenbergs Buch ‚Vom wachsenden Erdball‘, 1933.

Hilgenberg, Egyed und Carey blieben ihr Leben lang von der Expansionstheorie überzeugt. Im Gegensatz zur Kontraktions- hat die Expansionstheorie bis heute eine gewisse Anhängerschaft, die nicht weniger fragwürdige Erklärungen für die Volumenzunahme der Erde bemüht: Gemäss James Maxlow, einem australischen Geologen, sollen angeblich elektrisch geladene Teilchen des Sonnenwindes¹² tief in die Erde eindringen, sich im Erdmantel zu neuen Elementen verbinden und auf diese Weise Masse und Volumen der Erde vergrössern. Er beruft sich damit auf eine „alternative Physik“, genannt „Plasmakosmologie“, die davon ausgeht, dass elektrische Kräfte im Universum eine viel grössere Rolle spielen als – wie von der klassischen Physik angenommen – die Gravitationskraft, welche z. B. dafür verantwortlich ist, dass die Planeten um die Sonne kreisen statt sich von ihr in die Weiten des Alls zu entfernen.

Empirisch ist die Expansionstheorie allerdings nicht mehr zu halten: Neueren Studien zufolge (Williams, 2000, Wu et al., 2011), hat sich in der Vergangenheit weder der Radius der Erde verändert noch die Gravitationskonstante. Auch Satellitenvermessungen ergaben keine Anhaltspunkte für eine Ausdehnung innerhalb der Genauigkeitsgrenze von 0.2 mm. Somit spricht nichts mehr für die Expansionstheorie, alles hingegen für Kontinente, die sich verschieben, wenn auch die Vorstellungen Wegeners und seiner Anhänger noch ein ganzes Stück von der heute anerkannten Theorie der Plattentektonik entfernt waren.

¹² Der Sonnenwind ist ein Strom geladener Teilchen, der ständig von der Sonne in alle Richtungen abströmt.