

Evolution der Erde 8: Plattentektonik

Wissenschaftliche Revolutionen

In seinem legendären Buch „The Structure of Scientific Revolutions“ von 1962 wies der Wissenschaftsphilosoph Thomas Kuhn darauf hin, dass die Wissenschaft ganz anders funktioniert, als die meisten Menschen denken. Sie ist kein langsamer, stetiger, ununterbrochener Marsch zur endgültigen Wahrheit. Stattdessen durchläuft sie Perioden, in denen jeder „normale Wissenschaft“ betreibt und bestimmte Grundvoraussetzungen und Annahmen akzeptiert (ein Paradigma im Sinne Kuhns).

Mit der Zeit häufen sich jedoch Anomalien, Probleme und Unstimmigkeiten mit dem vorherrschenden Paradigma. Dann denkt jemand „über den Tellerrand“ hinaus und entwickelt ein völlig neues Paradigma für seine Wissenschaft, das die Annahmen des alten Paradigmas verwirft. Dieser Paradigmenwechsel führt zu einer wissenschaftlichen Revolution.

Kuhns wichtigstes Beispiel war die kopernikanische Revolution in der Astronomie, bei der nur eine einfache Änderung des Grundmodells (die Sonne und nicht die Erde in den Mittelpunkt des Sonnensystems zu stellen) viele Probleme mit dem alten ptolemäischen geozentrischen System löste und zu einem völlig neuen Weltbild führte. Die Newtonsche Physik veränderte die Bereiche der Mechanik, die noch in den falschen Vorstellungen des Aristoteles verhaftet waren. Die Einsteinsche Relativitätstheorie revolutionierte die Physik ein weiteres Mal, da die Newtonsche Mechanik im Bereich der Dinge, die sich nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen, nicht anwendbar ist.

Ebenso hat die Darwinsche Evolution die alten kreationistischen Vorstellungen vom Leben über den Haufen geworfen, und die Biologie ist seitdem nicht mehr dieselbe. Es ist nicht klar, ob es in der Chemie eine echte wissenschaftliche Revolution gegeben hat, obwohl einige Schlüsselideen vorgeschlagen wurden, wie z. B. Mendelejew's Entwicklung des Periodensystems.

Im Gegensatz zu anderen Wissenschaften erlebte die Geologie ihre wissenschaftliche Revolution erst vor kurzem, nämlich zu Lebzeiten vieler heute noch lebender Geologen. Das alte Paradigma ging lange Zeit davon aus, dass die Kontinente fest und stabil sind, und die erste wirkliche Infragestellung dieser Vorstellung erfolgte 1915, als der deutsche Meteorologe Alfred Wegener (Abb. 1) den Titel „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“ veröffentlichte. Die Idee wurde jedoch jahrzehntelang verworfen, bis sich in den 1950er Jahren neue Daten aus der Meeresgeologie und aus

der Untersuchung der alten Magnetfelder von Gesteinen an Land ansammelten, die zeigten, dass sich die Kontinente tatsächlich bewegt hatten. In den Jahren 1962 und 1963 wurde durch eine Reihe von Schlüsselentdeckungen das neue Paradigma der Geologie, die Plattentektonik, begründet.



Abb. 1: Alfred Wegener

Wegeners Hypothese

Betrachten wir uns doch mal den afrikanischen und südamerikanischen Kontinent (Abb. 2). Schon um 1500, als die ersten guten Landkarten des Südatlantiks veröffentlicht wurden, spekulierten einige, dass Südamerika und Afrika einmal ein gemeinsamer Kontinent sein könnten, denn der Küstenverlauf Westafrikas passt zur Ostküste Südamerikas. Aber es war Alfred Wegener der diese Theorie versuchte wissenschaftlich zu untermauern.



Abb. 2: Afrika, Südamerika

Während der Weihnachtsferien 1910 warf Wegener zufällig einen Blick auf einen Weltatlas, den er einem seiner Freunde geschenkt hatte. Wie er sich später erinnerte, war er erstaunt, wie gut die Atlantikküsten Südamerikas und Afrikas zusammenzupassen schienen. Doch Wegener beließ es nicht dabei, wie die meisten Menschen vor ihm. Schon bald begann er, Beweise für die Verteilung von Fossilien und Gesteinen zu sammeln, die auf alte Klimazonen und alte Breitengrade der Kontinente hindeuteten, sowie weitere Daten, die darauf hindeuteten, dass alle Kontinente einst zu einem Superkontinent vereinigt waren, den er Pangäa nannte (was auf Griechisch "alle Länder" bedeutet). Bis 1912 hatte er einige Vorträge über seine Ideen gehalten und drei kurze Artikel in einer deutschen geografischen Zeitschrift veröffentlicht.

Während des Ersten Weltkriegs, bei dem Wegener in die Armee eingezogen wurde und für den Wetterdienst arbeitete, schrieb er sein Buch über die Entstehung der Kontinente fertig, das Ende 1915 veröffentlicht wurde. Seine Ideen waren aber kaum bekannt geblieben und wenig akzeptiert. Schließlich stellte er seine Ideen 1926 auf der Tagung der American Association of Petroleum Geologists in New York City vor, wo alle seine Ideen ablehnten, außer dem Vorsitzenden der Tagung, der ihn eingeladen hatte. Obwohl seine Theorien von den Geologen weiterhin verschmäht wurden, arbeitete Wegener hart weiter und sammelte 1929 Daten in Grönland. Im Jahr 1930 führte er seine vierte und letzte Expedition nach Grönland durch, die größte, die er je unternommen hatte. Im November 1930 kehrten er und ein Partner von einer Versorgungsfahrt zu ihrem abgelegenen Lager im Zentrum des grönländischen Inlandeises zurück, als ihnen die Lebensmittel ausgingen und sie in schlechtes Wetter gerieten.

Dort erfror Wegener im relativ jungen Alter von 50 Jahren. Dort erfror Wegener im relativ jungen Alter von 50 Jahren. Sein Partner begrub seinen Leichnam auf dem grönländischen Inlandeis, wo er noch heute unter mehreren Metern Eis ruht. Wegener erlebte nicht mehr, dass seine revolutionären Ideen Unterstützung fanden, die erst in 30-35 Jahren kommen sollte.

Wegners Buch „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“ sammelte alle ihm zugänglichen Indizien für seine Hypothese.

Als Klimatologe war Wegener besonders beeindruckt von der Art und Weise, wie bestimmte geologische Ablagerungen stark vom Klima und der geografischen Breite gesteuert werden: Eiskappen an den Polen, Regenwälder in den Tropen und Wüstenablagerungen im Hochdruckgürtel der mittleren Breiten zwischen 10° und 40° nördlich und südlich des Äquators. Wenn man jedoch in die Permzeit (250-300 Mio. Jahre) zurückgeht, ergibt die Lage dieser alten Ablagerungen auf einem modernen Globus keinen Sinn mehr (Abb. 3).

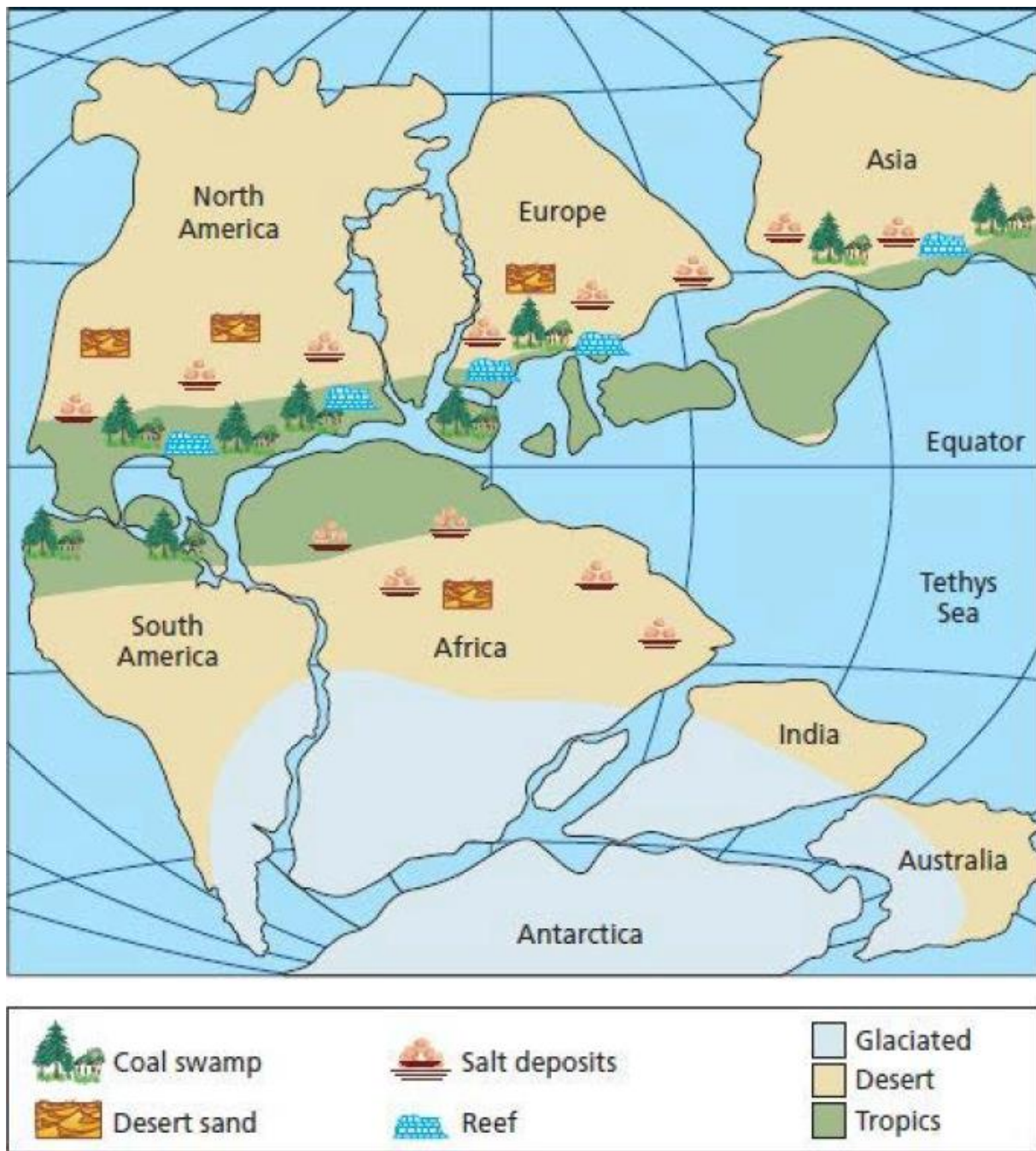


Abb. 3: Die Gesteinsarten, die die wichtigsten Klimagürtel im Perm repräsentieren (polare Eiskappe, subtropische Wüsten und tropische, sumpfige Regenwälder, die Kohle bilden), machen nur in einer Pangea-Konfiguration Sinn. Würde man diese Kontinente an ihre heutige Position verschieben, würden sich diese Ablagerungen in den falschen Breitengraden befinden, um sich so zu bilden, wie sie es heute tun.

Die südpolaren Eisschilde erstreckten sich von Südamerika und Afrika über den Äquator bis nach Indien, was eine klimatologische Absurdität ist (Abb. 4). Nur wenn man die Kontinente in ihre permische Konfiguration als Teil eines einzigen Superkontinents, Pangea, zurückversetzt, ergeben sie einen Sinn.

Wenn sich die Kontinente nicht bewegt hätten, warum verliefen dann die Kratzer im Grundgestein, die durch die von den Gletschern des Perms mitgeschleppten Felsen entstanden, von Afrika nach Südamerika (Abb. 4)? Dazu müsste der Gletscher in den

Atlantik springen, in einer geraden Linie über den Atlantik von Afrika nach Brasilien fließen und dann wieder aus dem Ozean springen! Ebenso machen all die alten permischen Wüstenablagerungen und Kohlesümpfe der tropischen permischen Regenwälder nur dann Sinn, wenn man sie in ihre Pangea-Lage zurückversetzt, und nicht in ihre heutigen Breitengrade. Sogar die alten präkambrischen Gesteine in Südamerika und Afrika unter den permischen Ablagerungen passten genau zusammen, wie Teile eines Puzzles.

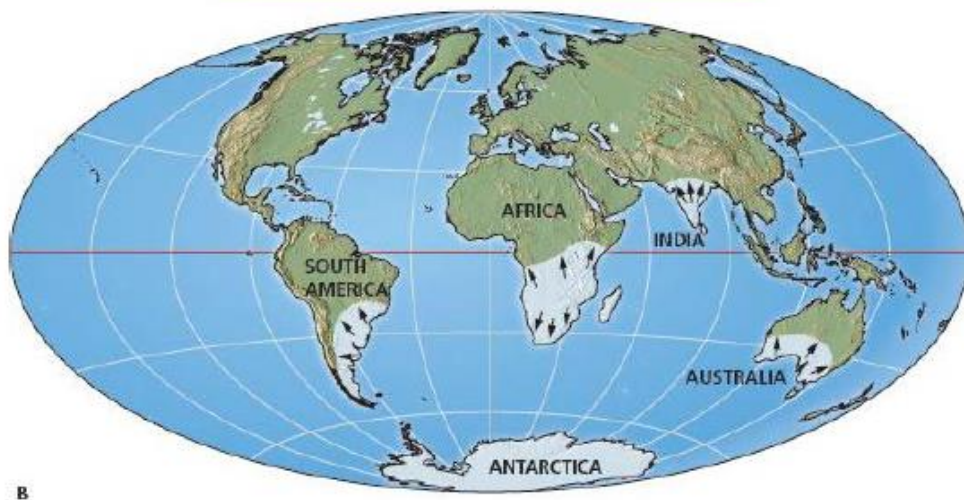
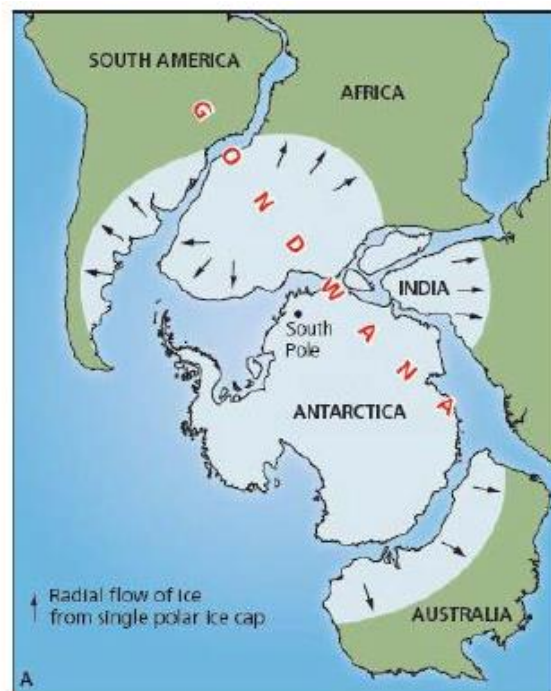


Abb. 4: A. Das Auftreten der permischen Gletscherablagerungen macht nur Sinn, wenn das Eisschild einst Gondwana und den Südpol bedeckte. B. Bei der heutigen Lage der Kontinente müsste die permische Eiskappe absurde Dinge tun, z. B. den Äquator überqueren, um Indien zu erreichen, und große Gebiete des Indischen und Südatlantischen Ozeans bedecken. Außerdem decken sich die Gletscherkratzer und -rillen (z. B. im südwestlichen Afrika) mit denen in Brasilien und Argentinien, was bedeutet, dass die Gletscher in den Atlantik hätten eintauchen, ihn auf einem seltsam gekrümmten Weg überqueren und dann in Südamerika an Land klettern müssen, wenn der moderne Atlantik bereits im Perm existiert hätte.

Die Indizien aus den permischen Fossilien (Abb. 5) haben all dies bestätigt. Südamerika war voll von charakteristischen Fossilien, die es mit anderen Kontinenten teilte, insbesondere mit dem südlichen Afrika. Es gab charakteristische, ausgestorbene Samenfarne, die als *Glossopteris* bekannt sind und auf allen Kontinenten der südlichen Landmasse, bekannt als Gondwana, gefunden wurden. Es gab kleine Wasserreptilien wie den *Mesosaurus*, der in Seen in Brasilien und Südafrika gefunden wurde, und Synapsiden wie den bulldoggengroßen, schnabelartigen Pflanzenfresser *Lystrosaurus* und das bärenähnliche Raubtier *Cynognathus*, die niemals den heutigen Atlantik hätten durchschwimmen können. Für Wegener (und für jeden modernen Geologen) hätten diese Indizien klar und eindeutig sein müssen: Die Kontinente drifteten auseinander.

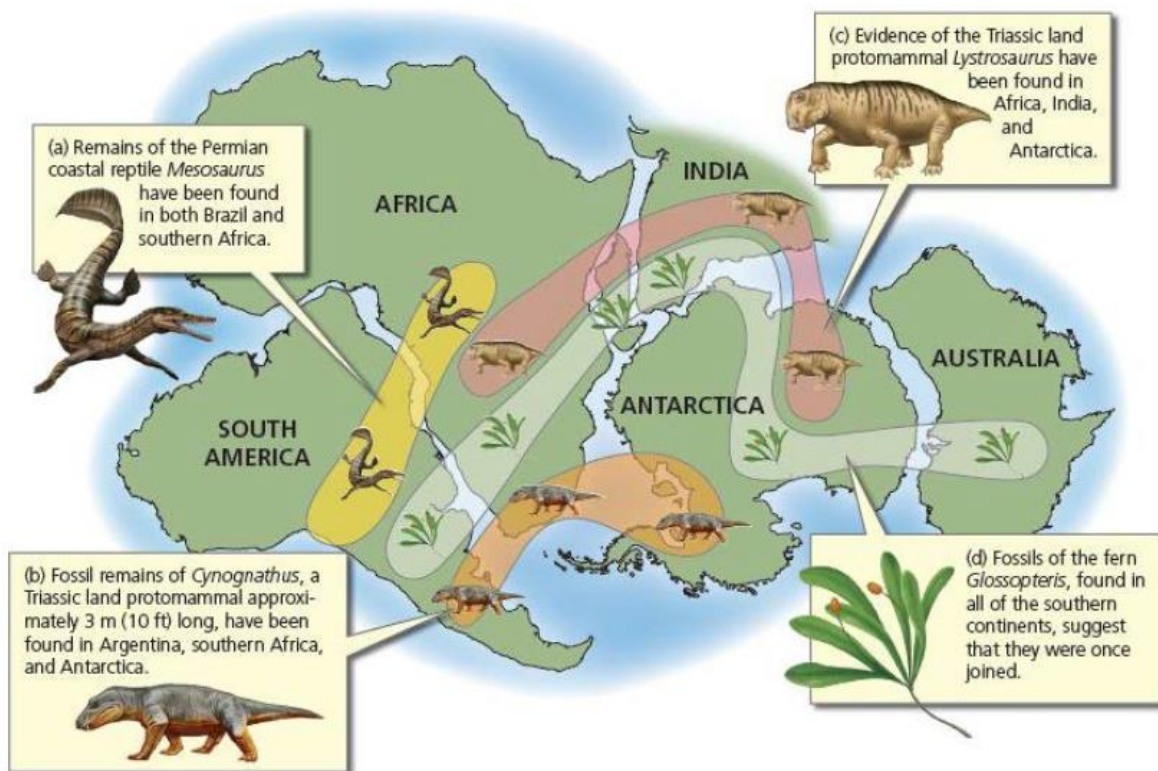


Abb. 5: Die charakteristischen Pflanzen und Tiere des Perms verbinden die verschiedenen Kontinente Gondwanas miteinander. Das kleine Wasserreptil *Mesosaurus* und das bärengroße Ur-Säugetier *Cynognathus* sind beide in Brasilien und Südafrika zu finden. Der schweineartige, schnabelartige Protosäugetier *Lystrosaurus* kommt in Afrika, Madagaskar, Indien und der Antarktis vor. Der Samenfarn *Glossopteris* findet sich auf allen Kontinenten des Gondwana.

Aber warum fand dann Wegeners Hypothese keine Anhänger?

Zum einen gab es soziologische Auswirkungen. Zunächst einmal war Wegener kein formal ausgebildeter Geologe, und es gibt eine natürliche Abneigung, Ideen von

außerhalb des eigenen Fachgebiets zu akzeptieren, die gegen die eigenen Grundannahmen zu verstoßen scheinen.

Ein weiteres Problem war, dass Wegeners Beweise hauptsächlich aus der südlichen Hemisphäre (vor allem aus Südamerika und Afrika) stammten, aber fast alle Geologen der Welt lebten damals in Europa oder Nordamerika. Nur sehr wenige waren jemals nach Südafrika oder Brasilien gereist, was damals lange und teure Reisen mit dem Ozeandampfer bedeutete. Natürlich sind die Beweise viel überzeugender, wenn man sie persönlich sehen kann, anstatt sie in Schrift und winzigen Schwarz-Weiß-Fotos zu lesen, die damals in Zeitschriften üblich waren. Tatsächlich befanden sich Wegeners größte Befürworter, wie der südafrikanische Geologe Alexander du Toit, zumeist auf der Südhalbkugel und sahen die Beweise aus erster Hand. Sie wiesen darauf hin, dass die permischen Gesteine Südafrikas und Brasiliens praktisch identisch waren; der einzige Unterschied bestand darin, dass erstere Namen auf Afrikaans und letztere auf Portugiesisch hatten. Ein weiterer Befürworter war der britische Geologe Arthur Holmes, der wegen seiner Pionierarbeit auf dem Gebiet der radiometrischen Datierung in den Jahren 1913-1915 als "Vater der geologischen Zeitskala" bekannt ist. Er machte sich Wegeners Ideen zu eigen - allerdings hatte er als Geologe in Afrika gearbeitet, bevor er nach England zurückkehrte. Holmes veröffentlichte in seinen weit verbreiteten Geologie-Lehrbüchern in den 1920er Jahren zum ersten Mal kühn Diagramme, die die Drift von Kontinenten und Mantelströmungen zeigten, die diese Kontinente umherschoben - 40 Jahre bevor die geologische Fachwelt diese Idee akzeptierte.

Doch Wegeners Ablehnung war nicht nur auf soziologische Vorurteile zurückzuführen. Wegener hatte keinen Mechanismus, um zu erklären, wie die Kontinente drifteten, und die von ihm vorgeschlagenen Ideen (wie die Zentrifugalkraft) waren nicht sehr plausibel. Wegener postulierte, dass die Kontinente durch die Anziehungskraft der äquatorialen Ausbuchtung der Erde oder durch Gezeitenkräfte von den Polen weggetrieben wurden, aber Geophysiker zeigten, dass dies unmöglich war. Wegeners Kritiker argumentierten, dass, wenn die Kontinente die Ozeanbecken durchpflügt hätten, an ihren Vorderkanten riesige Bereiche ozeanischer Kruste liegen müssten, die wie der Schnee auf einem Schneepflugschwert zusammengepresst sind - und solche Ablagerungen waren nie gefunden worden. In der Zwischenzeit taten sie die Übereinstimmungen in den Gesteinen der Kontinente als nicht schlüssig ab und dachten sich phantastische Landbrücken aus, um zu erklären, wie Tiere den Atlantischen Ozean überquert haben könnten. Sie fuhren fort, Wegener zu verunglimpfen und seine Ideen jahrzehntelang der Lächerlichkeit preiszugeben. In den 1940er Jahren veröffentlichte der führende amerikanische Paläontologe George Gaylord Simpson zahlreiche Arbeiten, in denen er argumentierte, dass die Fossilien keine Kontinentalverschiebung erforderten. Seine Institution, das American Museum of Natural History, veranstaltete 1949 ein großes Symposium, auf dem alle Beweise für die Kontinentalverschiebung zurückgewiesen wurden.

Die Geburt der Plattentektonik

Ironischerweise kamen gerade zu dem Zeitpunkt, als die Verachtung Wegeners seinen Höhepunkt erreichte, neue Indizien aus einer unerwarteten Richtung: vom Grund des Ozeans. Sowohl Wegener als auch seine Kritiker wussten überhaupt nicht, wie die ozeanische Kruste wirklich beschaffen war. Niemand wusste wirklich etwas über die Erdkruste unter den Ozeanen. Tatsächlich kamen die Antworten erst nach dem Zweiten Weltkrieg, als die moderne Meeresgeologie geboren wurde. Nach Kriegsende verkaufte oder verschenkte die US-Marine gerne überschüssige Schiffe und Ausrüstungen (anstatt sie zu verschrotten) an neu gegründete ozeanographische Institute. Außerdem lernten das Militär und die US-Regierung durch die U-Boot-Taktik während des Krieges, dass sie zu wenig über die Weltmeere wussten. Bundesmittel zur Erforschung der Ozeane während des Kalten Krieges, als sich amerikanische und sowjetische U-Boote gegenseitig anpirschten, wären eine gute Investition gewesen. In den späten 1940er und 1950er Jahren finanzierten mehrere ozeanografische Institute Schiffe, die routinemäßig die Weltmeere durchquerten, die Tiefe des Meeresbodens und die Struktur des Gesteins unter dem Meeresboden genauestens untersuchten und überall seismische, gravimetrische und magnetische Daten sowie Sedimentkerne sammelten. In den späten 1950er Jahren hatten die Wissenschaftler dank der ersten detaillierten Karten des Meeresbodens von Marie Tharp und ihrem Partner Bruce Heezen (Abb. 6) zum ersten Mal ein wirkliches Bild davon, wie 70 % der Erdoberfläche tatsächlich aussehen. Mitte der 1950er Jahre erkannte Tharp, dass es unter dem Meer eine gigantische Gebirgskette gab, die als Mittelatlantischer Rücken bekannt war. Er war nicht nur der längste Gebirgszug der Erde, sondern mit über 5000 m auch höher als die meisten Gebirgszüge der Erde.

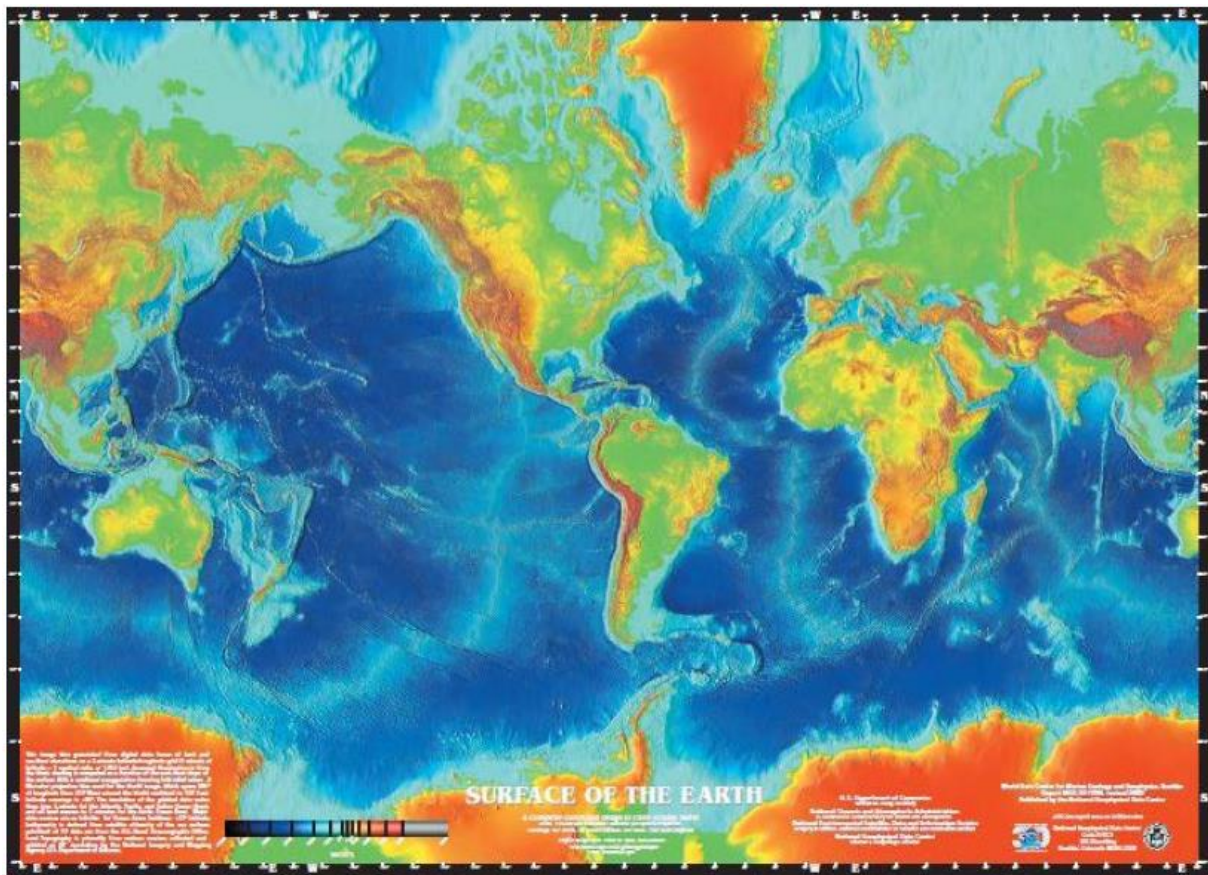


Abb. 6: Eine moderne Version der Karte von Heezen und Tharp des Weltmeeresbodens, die den Mittelatlantischen Rücken, den Ostpazifischen Rücken, die Gräben im westlichen Pazifik und andere Merkmale des Meeresbodens zeigt.

Außerdem wies der Mittelatlantische Rücken auf seiner gesamten Länge einen riesigen Graben auf, der tiefer war als der Grand Canyon, wo er auseinandergezogen war und Krustenblöcke entlang von Verwerfungen nach unten gefallen waren. Tharp war eine gute Geologin und erkannte sofort, dass ein Grabenbruch darauf hindeutet, dass sich der Meeresboden auseinanderzieht und ausbreitet. Ihre Mitautoren Heezen und der Lamont-Direktor Maurice Ewing waren jedoch zu vorsichtig, um eine solch ketzerische Idee zu veröffentlichen und zu verbreiten, so dass die Anerkennung für ihre Entdeckung anderen zufiel.

Die Bestätigung der Idee der Ausbreitung des Meeresbodens im Jahr 1963 war der entscheidende Beweis, der die Revolution der Plattentektonik einleitete.

Alte magnetische Daten wurden in den 1950er Jahren von Gesteinen an Land auf vielen verschiedenen Kontinenten gesammelt. Viele Gesteinsarten zeichnen das Erdmagnetfeld auf, während sie sich bilden, und geben nicht nur seine Richtung, sondern auch seine Stärke an. Als die Paläomagnetiker immer ältere Gesteine untersuchten und maßen, schienen ihre Ergebnisse zu zeigen, dass der magnetische Nordpol weit vom heutigen Pol entfernt war und durch die Zeit zu wandern schien. Dies wurde zunächst als "Polwanderungshypothese" bezeichnet. Doch dann stießen sie auf ein Problem. Jeder Kontinent wies eine völlig andere Polarwanderungskurve auf, die erst heute auf einem gemeinsamen Magnetpol zusammenläuft (Abb. 7).

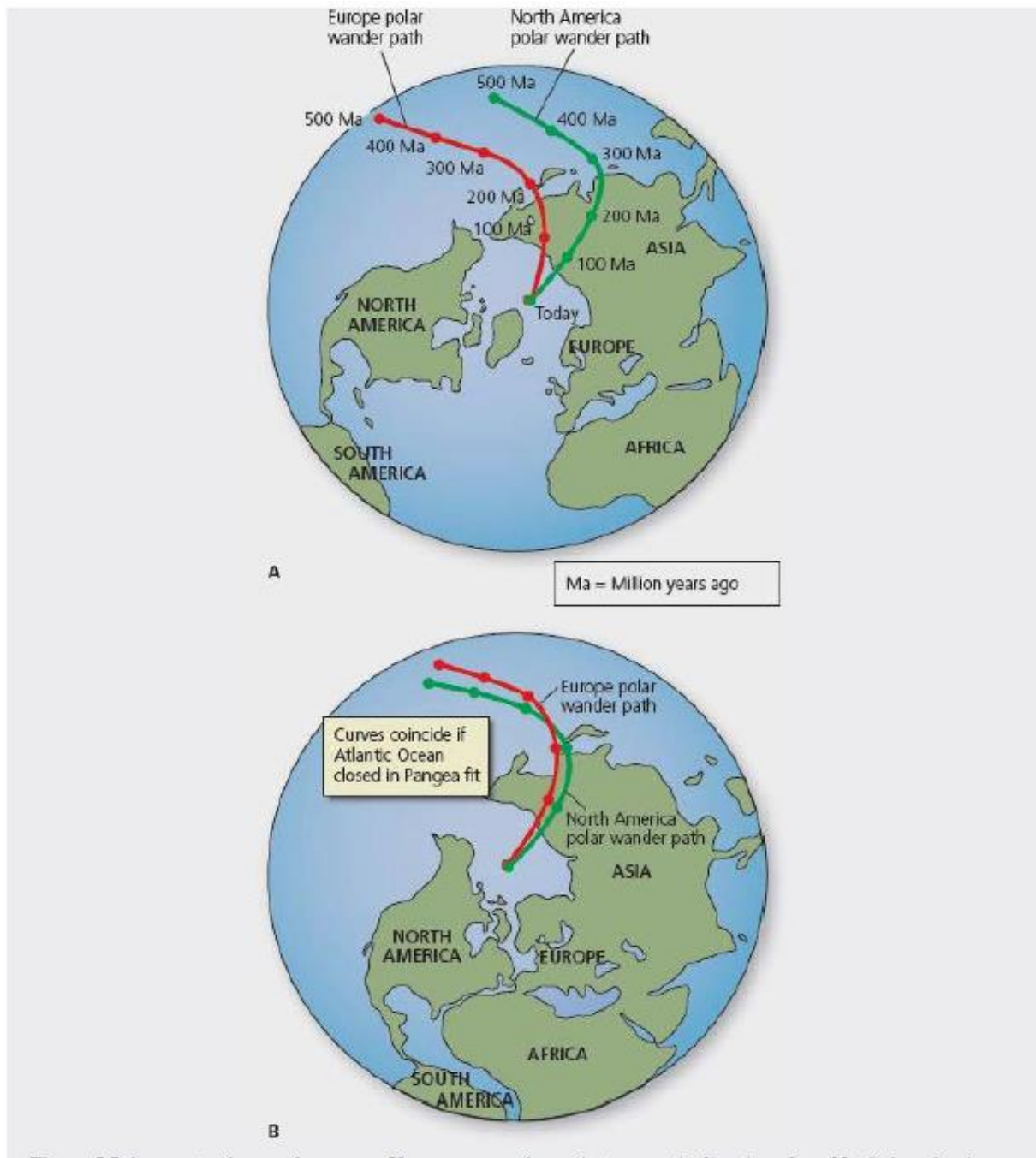


Abb. 7: Scheinbare Polarwanderungskurven. Misst man die alten magnetischen Richtungen von Nordamerika aus (grüne Kurve), so scheint der magnetische Nordpol weit von seiner heutigen Position entfernt zu sein und erreicht seine heutige Lage erst in der magnetischen Richtung der jüngsten Gesteine. Macht man dasselbe für die europäischen Gesteine, erhält man eine völlig andere Lage des magnetischen Nordpols in der geologischen Vergangenheit (rote Kurve), die zufällig mit dem modernen magnetischen Nordpol in den jüngsten Gesteinen zusammenfällt. Entweder gab es also viele verschiedene Magnetpole, die in der Vergangenheit weit auseinander lagen und erst in jüngster Zeit konvergierten, oder man verschiebt die Kontinente auf ihre alten Positionen, stimmen die Polwanderungskurven überein.

Diese Daten schienen darauf hinzudeuten, dass sich das Magnetfeld in der Vergangenheit sehr seltsam verhalten hatte, mit mehreren Richtungen des magnetischen Nordens, die heute nicht mehr existieren. So ungeheuerlich diese Vorstellung auch schien, die einzige Alternative war ebenso radikal: Die Kontinente

hatten sich im Laufe der Zeit bewegt, so dass sich nicht der Magnetpol veränderte, sondern die Kontinente ihre Richtungen aufzeichneten. Aber wenn man die Polarwanderungskurven für zwei verschiedene Kontinente (Abb. 7), wie Europa und Nordamerika, aneinanderreichte, stellte man fest, dass sie übereinstimmten, sobald man die Kontinente wieder zusammenführte, wie Wegener es vorgeschlagen hatte. Mit anderen Worten: Die "Polarwanderungskurven" waren nur scheinbare Polarwanderungskurven, weil sich die Kontinente bewegten, nicht die magnetischen Pole.

Andere Paläomagnetiker entdeckten in den 1950er und 1960er Jahren ein merkwürdiges Phänomen: Einige Gesteine wiesen magnetische Richtungen auf, die in die entgegengesetzte Richtung der heutigen zeigten (Abb. 8).

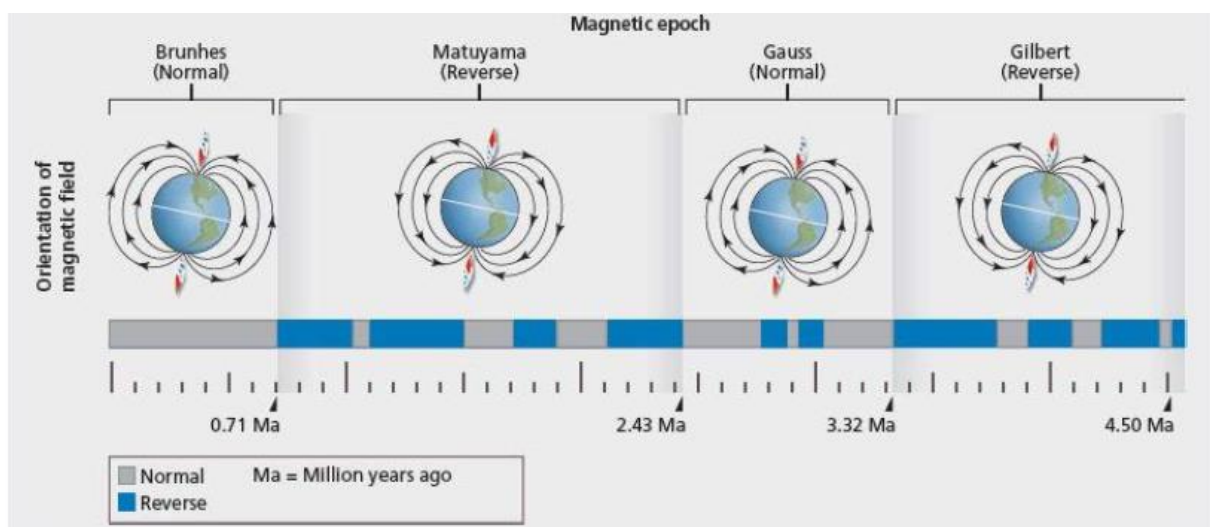


Abb. 8: Die magnetische Polarität der Erde hat sich in den letzten 50 Millionen Jahren Hunderte von Malen von normal (wie heute) auf 180° entgegengesetzt zum heutigen Pol geändert. Allein in den letzten 5 Millionen Jahren gab es über ein Dutzend Polaritätsumkehrungen, oder "magnetische Umkehrungen".

Wenn man zum Beispiel vor 800.000 Jahren einen Kompass auf der Nordhalbkugel in die Hand nahm, zeigte die Nadel nach Süden und nicht nach Norden. Zunächst schob man dies auf eine besondere Eigenschaft der Gesteinsproben zurück. Doch je mehr Beispiele gefunden wurden, desto weniger abwegig erschien die Vorstellung, dass das Erdfeld in der geologischen Vergangenheit seine Richtung geändert hatte. Um diese Idee zu überprüfen, führten Allan Cox von der Stanford University und Bob Doell vom US Geological Survey sowie G. Brent Dalrymple vom US Geological Survey eine entscheidende Analyse durch. Sie entnahmen Proben von Lavaströmen aus der ganzen Welt, maßen ihre magnetischen Richtungen und ermittelten ihr Alter. Wenn Gesteine desselben Alters überall auf der Welt dieselbe magnetische Richtung aufwiesen, dann war die Richtungsumkehr nicht länger eine Eigenart einzelner, sich selbst umkehrender Gesteine, sondern musste ein globales Phänomen sein, wie das Magnetfeld der Erde.

Anfang der 1960er Jahre hatten Cox, Doell und Dalrymple (in freundschaftlichem Wettstreit mit Ian McDougall, François Chamalaun und Don Tarling von der Australian National University) festgestellt, dass das Erdmagnetfeld von seiner heutigen Richtung

in eine Richtung um 180° entgegengesetzt zu der von uns heute gemessenen Richtung umschlägt.

Seitdem wurde das Muster der magnetischen Flip-Flops im Detail dokumentiert. Es hat sich in den letzten 100 Millionen Jahren Hunderte von Malen umgedreht, so dass sich ein zufälliges Muster aus normaler und umgekehrter Polarität ergibt, die wie die schwarz-weißen Streifen eines Barcodes aussehen. Wie ein Barcode enthält dieses Muster ein Signal und wird häufig verwendet, um die Flip-Flops in dicken Gesteinsschichten zuzuordnen und sie genau zu datieren (Abb. 9). Diese Aufzeichnung der Veränderungen des Erdmagnetfelds im Laufe der Zeit wird als Zeitskala der magnetischen Polarität bezeichnet. Diese Geschichte der Magnetfeldumkehr war der Schlüssel, der "Stein von Rosetta", der das letzte Problem der Kontinentalbewegung löste. Sie lieferte die letzten entscheidenden Daten, die dazu beitrugen, die Idee der Plattentektonik ernst zu nehmen. Seit den 1940er Jahren schleppten ozeanographische Schiffe Protonenpräzessionsmagnetometer hinter sich her, die das magnetische Signal über dem Meeresboden aufzeichneten. Diese Geräte sehen aus wie ein langer Torpedo an einem Kabel und wurden ursprünglich im Zweiten Weltkrieg entwickelt, um U-Boote aufzuspüren. Im Laufe der Jahre sammelten sie magnetischen Daten über den Meeresboden, aber zunächst konnten sich die Meeresgeophysiker keinen Reim auf das machen, was sie sahen. Als sie zum Beispiel das Magnetometer über einen mittelozeanischen Rücken schleppten, war das aufgezeichnete Magnetfeld stärker als das normale Erdmagnetfeld, dem wir immer ausgesetzt sind (Abb. 9). Diese überdurchschnittlich starke Feldrichtung wurde als positive magnetische Anomalie bezeichnet. Wenn sie das Magnetometer jedoch einige Dutzend Kilometer zu beiden Seiten des Bergrückens schleppten, erhielten sie eine schwächere als die durchschnittliche Magnetfeldstärke oder eine negative magnetische Anomalie. Was bedeuteten diese merkwürdigen Ergebnisse? Über ein Jahrzehnt lang war dies ein großes Rätsel, vor allem weil die ersten magnetischen Vermessungen, wie die des Ostpazifiks, sehr kompliziert und schwer zu entschlüsseln waren. Der Schlüssel kam 1963, als Fred Vine und Drummond Matthews von der Universität Cambridge ein viel einfacheres Profil über dem Mittelatlantischen Rücken analysierten. Sie stellten fest, dass das Muster der magnetischen Anomalien symmetrisch war, mit positiven magnetischen Anomalien in der Mitte des Rückens, aber negativen Anomalien auf beiden Seiten und dann einer Reihe von symmetrischen magnetischen "Streifen", die sich vom Rücken weg nach außen bewegen (Abb. 9).

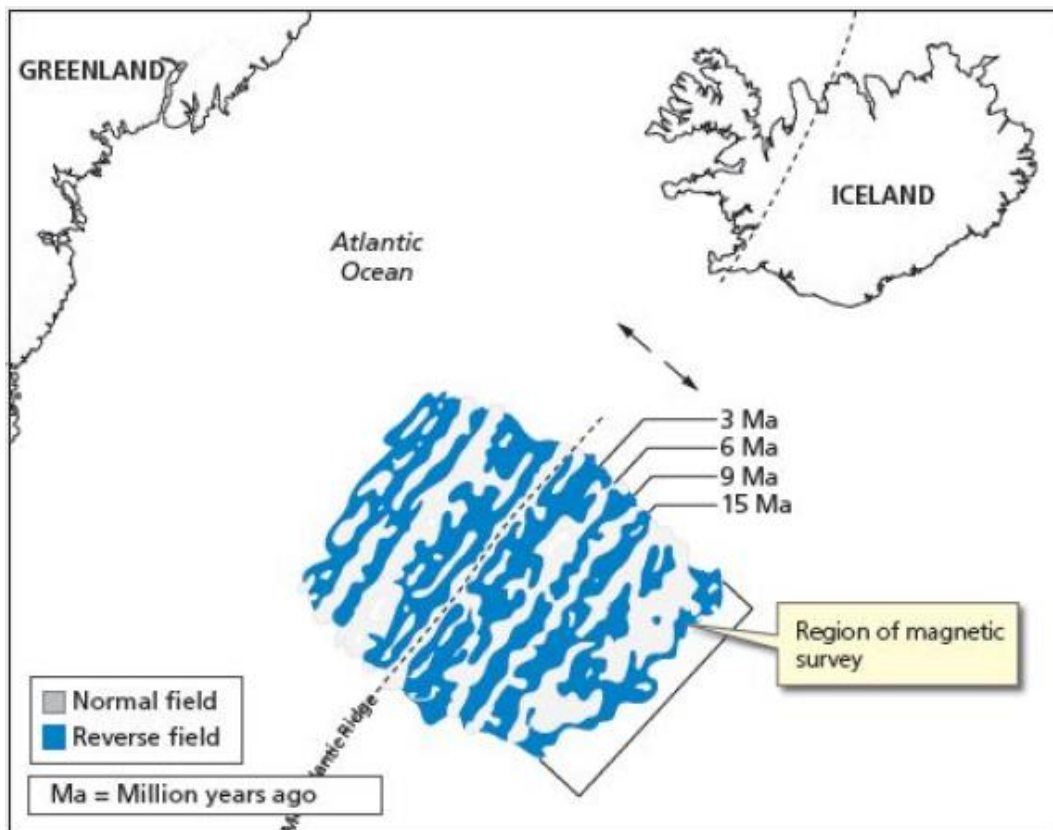


Abb. 9: Die magnetischen Anomalien waren über dem mittelozeanischen Rücken symmetrisch (hier die Daten des Reykjanes-Rücken-Segments des mittelatlantischen Rückens südlich von Island), was nur Sinn macht, wenn es sich um die Aufzeichnung des alten Magnetfelds mit normaler und umgekehrter Polarität handelt, das in den Felsen des sich ausbreitenden Meeresbodens eingefroren ist und sich allmählich wie zwei Förderbänder vom Kamm des Mittelatlantischen Rückens wegbewegen.

Vine und Matthews erkannten, dass die Gesteine auf dem Meeresboden in unterschiedliche Richtungen magnetisiert sein müssen. Die Felsen in der Mitte des mittelozeanischen Rückens waren in den letzten 800.000 Jahren ausgebrochen, so dass ihre normale magnetische Polarität die Richtung des modernen Hintergrundfeldes verstärken würde, was zu einer überdurchschnittlich starken Feldmessung auf dem Magnetometer führen würde. Die weiter vom Zentrum des Bergrückens entfernten Gesteine wurden jedoch vor mehr als 800.000 Jahren eruptiert und magnetisiert, wodurch sie eine umgekehrte magnetische Polarität erhielten. Wenn die umgekehrten Richtungen mit dem modernen Erdfeld interagieren, werden sie teilweise vom Hintergrundfeld abgezogen, da sie in die entgegengesetzte Richtung polarisiert sind. Aus diesem Grund zeichnet das Magnetometer eine schwächere als die durchschnittliche Messung oder eine negative magnetische Anomalie auf. Der Meeresboden ist also wie ein Magnetbandgerät, das ein Signal aus dem Erdfeld aufnimmt, wenn es in der Mitte des Rückens ausbricht, und sich dann passiv vom "Aufzeichnungskopf" wegbewegt und sein magnetisches Signal mit sich trägt (Abb. 10). Die Tatsache, dass das magnetische Signal auf beiden Seiten des Rückenkamms symmetrisch war, bedeutet, dass sich die ozeanische Kruste vom Rücken weg ausbreitet wie zwei Förderbänder, die sich von einem gemeinsamen Zentrum wegbewegen.

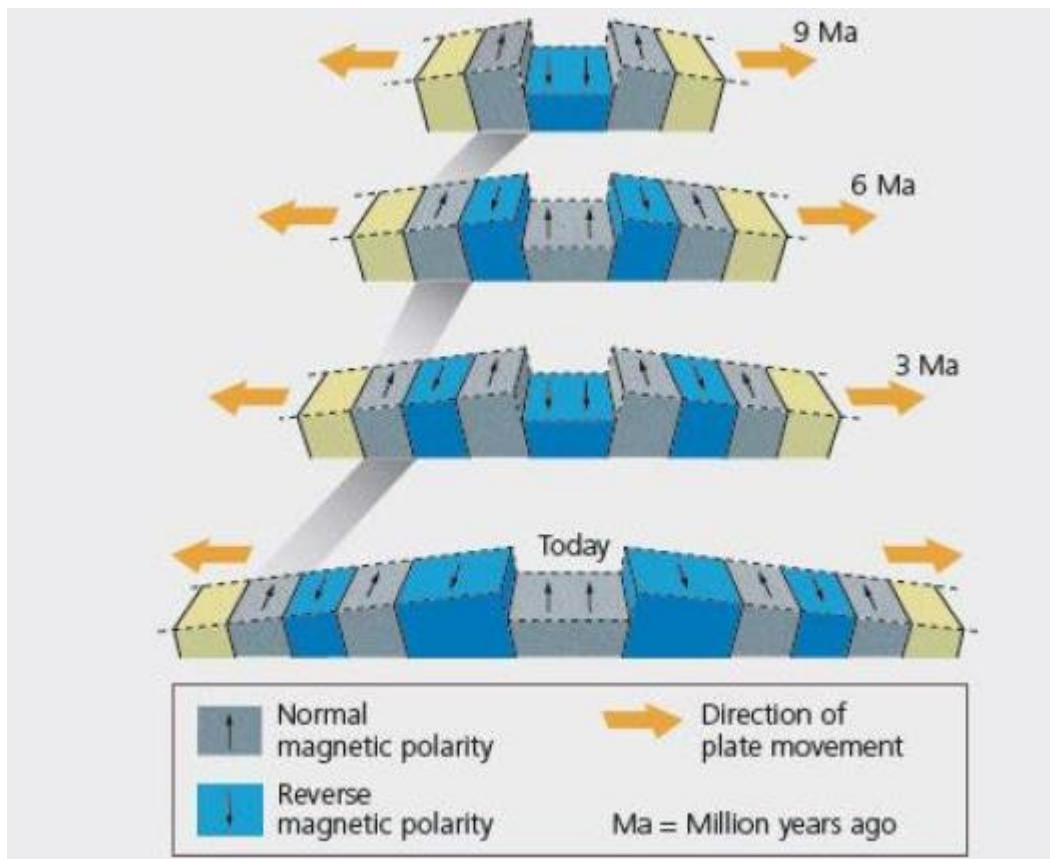


Abb. 10: Umkehrmuster mittelozeanischer Rücken, die entlang des mittelozeanischen Rückens ausbrachen, dann auseinanderbrachen und sich vom Rücken entfernten, als sich neuer Meeresboden bildete. Die magnetischen Umkehrmuster waren symmetrisch und deuten auf eine Ausbreitung des Meeresbodens hin.

Plattentektonik

Die Lithosphäre ist nach der heute anerkannten Theorie in tektonische Platten unterteilt und bewegt sich auf der darunterliegenden zähflüssigen Asthenosphäre. Hierbei wird zwischen zahlreichen kleinen Platten und den sieben großen Kontinentalplatten unterschieden (Abb. 11):

Eurasische Platte, Nordamerikanische Platte, Südamerikanische Platte, Afrikanische Platte, Australische Platte, Antarktische Platte, Pazifische Platte

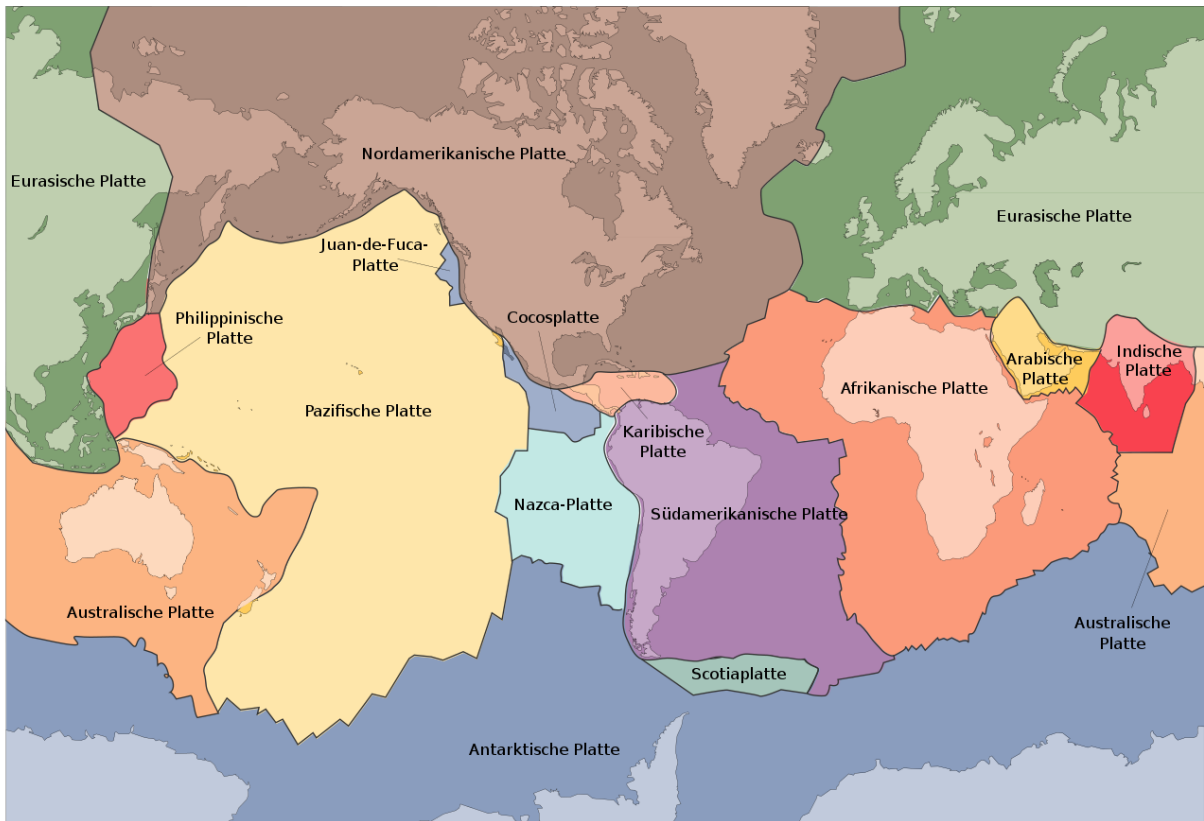


Abb. 11: tektonische Platten

Sie wurden nach den Kontinenten, Ländern oder Meeren benannt, die sie tragen. So trägt die eurasische Platte große Teile Asiens sowie den gesamten Kontinent Europa, und damit auch Deutschland. Neben den sieben Kontinentalplatten gibt es noch eine Reihe weiterer kleinerer Platten, wie die arabische, indische, karibische und Nazca-Platte. Die tektonischen Platten bewegen sich auf der darunterliegenden Schicht, aber wie funktioniert das? Dafür sind vor allem Konvektionsströme verantwortlich. Dabei steigt flüssiges Gestein, auch Magma genannt, aus tieferen Schichten auf. Dort kühlt das heiße Material ab und sinkt in tiefere Schichten zurück. Dadurch entsteht ein Strom, der langsam aber sicher dafür sorgt, dass die Platten sich in eine bestimmte Richtung bewegen.

Da unsere Erde allerdings von Erdplatten bedeckt ist, kommt es durch die Plattenverschiebung zu verschiedenen Vorgängen an den Plattengrenzen:

Divergenz:

Divergierende Platten (Abb. 12) driften voneinander weg. Überall dort, wo sich Platten voneinander entfernen, reißen sie den Boden auf — ob am Meeresgrund oder auch an Land. Hierbei gelangt heißes Gestein an die Erdoberfläche — genauer gesagt dringt Magma aus den tieferen Erdschichten nach oben und kühlt dort ab. Das Gestein drückt die Erdplatten zusätzlich auseinander. Beispiele hierfür sind der mittelatlantische Rücken oder Grabenbrüche wie der afrikanische Grabenbruch.

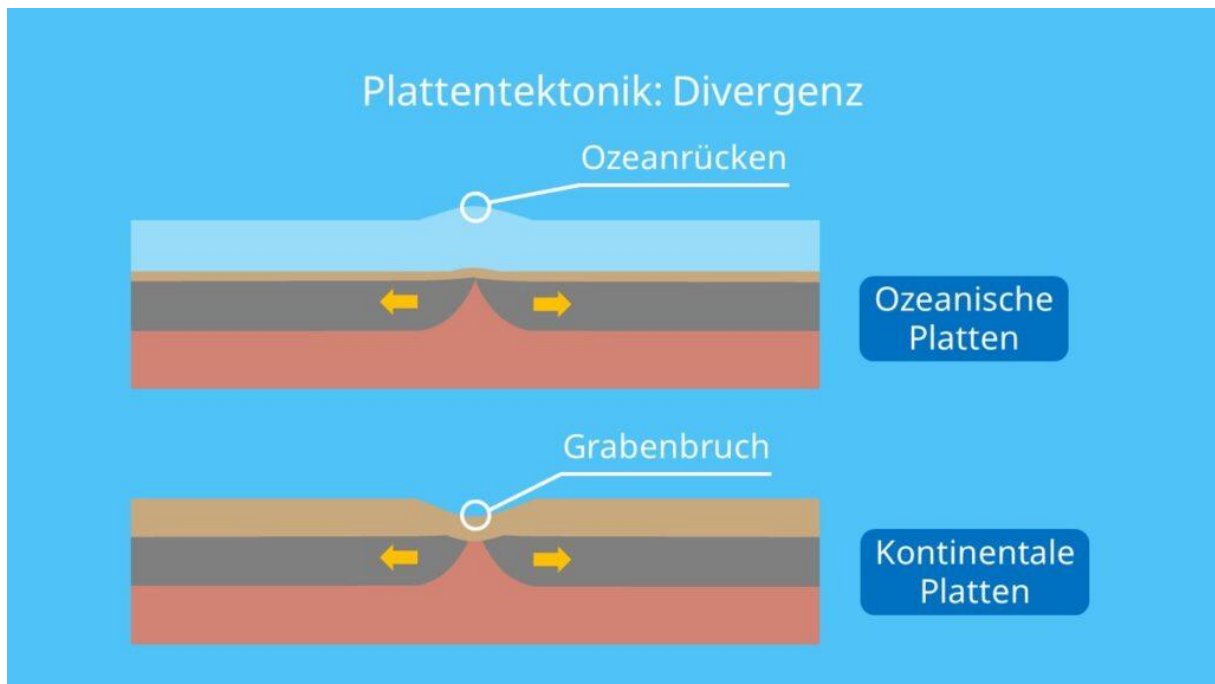


Abb. 12: Divergenz

Konvergenz:

Bei der Konvergenz bewegen sich die Erdplatten aufeinander zu. Da zwischen ihnen aber keine freie Fläche ist, die sie einnehmen können, kollidieren die konvergierenden Platten. Die Folgen der Kollision sind davon abhängig, welche Art von Erdplatten kollidieren.

Treffen eine kontinentale und eine ozeanische Platte aufeinander (Abb. 13), entsteht eine sogenannte Subduktionszone. Das bedeutet, dass die ozeanische Platte unter der kontinentalen abtaucht. Dabei heizt sich die abgesunkene (subduzierte) Platte auf und schmilzt teilweise.

An dieser Stelle steigt heißes Magma auf, welches man dann in Form von Vulkanen beobachten kann. Auf diese Weise sind zum Beispiel die Vulkane in Neuseeland und in den südamerikanischen Anden entstanden.

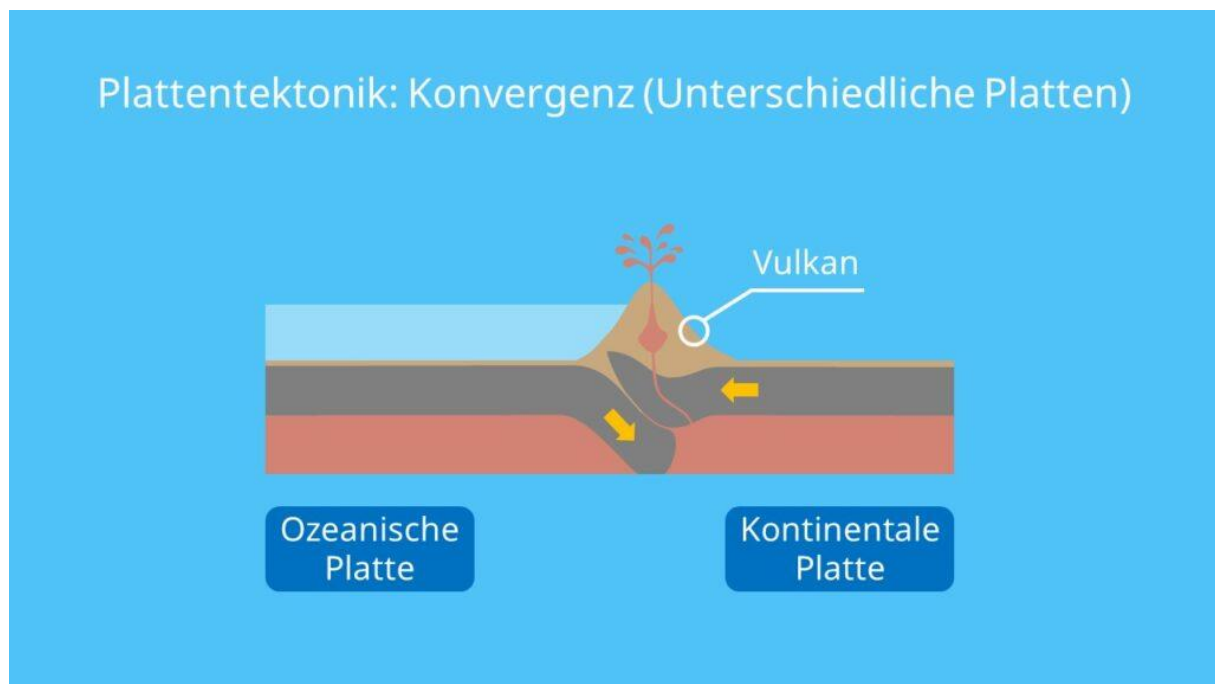


Abb. 13: Konvergenz, verschiedene Platten

Treffen zwei kontinentale Platten aufeinander (Abb. 14), sinkt keine von beiden tief ins Innere ab. Das liegt daran, dass die kontinentalen Platten zu leicht sind, um abzusinken. Vielmehr stoßen die Platten also gegeneinander, sodass eine der beiden nach oben ausweichen muss. Durch diesen Prozess der Plattentektonik entstehen aus der Erdkruste Gebirge, wie beispielsweise die Alpen und der Himalaya.

Plattentektonik: Konvergenz (Kontinentale Platten)

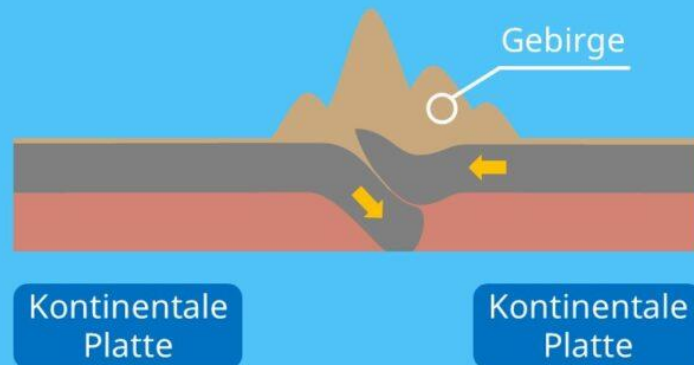


Abb. 14: Konvergenz (kontinentale Platten)

Beim Aufeinandertreffen zweier ozeanischer Platten kommt es ebenfalls zur Subduktion (Abb. 15). Das bedeutet, dass eine der Platten unter die andere sinkt. Die subduzierte, also abgesunkene, Erdplatte ist hierbei die ältere der Beiden, da sie in der Regel schwerer ist. Durch die Subduktion kommt es zur Bildung von vulkanischen Inselbögen, wie beispielsweise den Kurilen, einer Inselkette in der Nähe von Japan. Diese Art der Konvergenz ist allerdings eher selten.

Plattentektonik: Konvergenz (Ozeanische Platten)

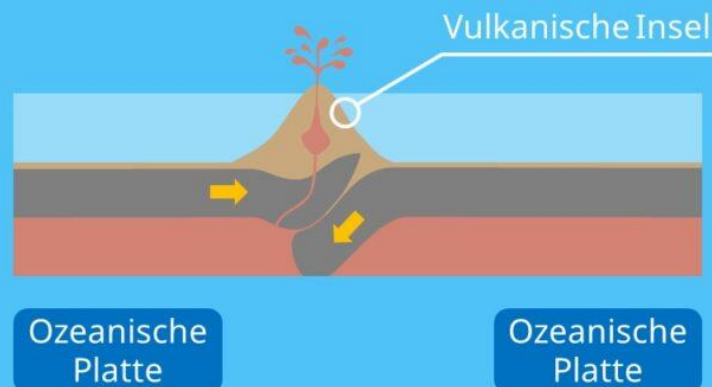


Abb. 15: Konvergenz (ozeanische Platten)

Transformstörung:

Die dritte Art von Plattengrenzen ist die Transformstörung (Abb. 16). Hierbei gleiten zwei Erdplatten aneinander vorbei. Bei einer solchen konservativen Plattengrenze kommt es zu Spalten im Boden, ohne dass bestehender Boden zerstört wird und neuer gebildet werden muss. Aufgrund der Reibung, ist an diesen Stellen das Auftreten von Erdbeben dafür sehr häufig.

Transformstörungen können zwischen ozeanischen, aber auch zwischen kontinentalen Platten stattfinden. Ein Beispiel für eine Spalte zwischen kontinentalen Erdplatten ist die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien.

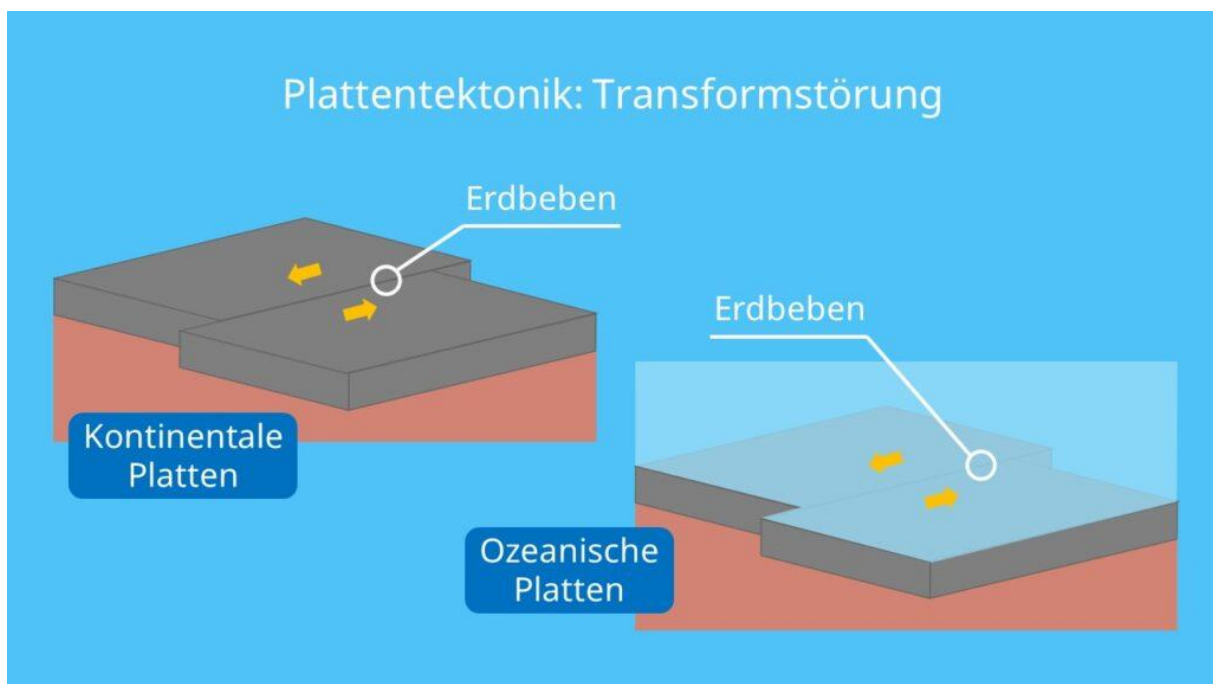


Abb. 16: Transformstörung

Literatur

Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie, 5.Auflage. Springer Verlag

Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Press/Siever Allgemeine Geologie, 7. Auflage, Springer Verlag

Prothero, D. (2021): The Evolving Earth. Oxford University Press

Prothero, D. & Dott, (2004): Evolution of the Earth, Seventh edition.