

Plattentektonik 2.0 – Ein neuer Blick auf ein altes Phänomen – Yvan Fischer
(für Abbildungen und mehr Details, siehe Vortragspräsentation im Mitgliederbereich der Geologie-Zirkel-Homepage: <https://geologie-zirkel-biberach.de/mitgliederbereich/>)

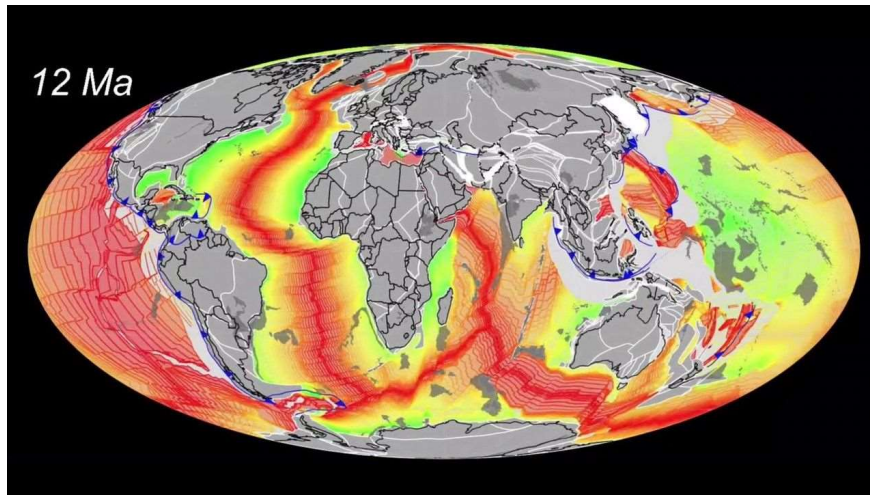


Bild: [Scotese, C.R., and Elling, R.P. \(2017\)](#)

Die moderne Theorie der Plattentektonik vermag es, eine Fülle von scheinbar unabhängigen Phänomenen, wie etwa Lage und Form der Kontinente, Vulkanismus, Erdbeben und Gebirgsbildung in einem einheitlichen, mittlerweile sehr solide belegten Rahmen in Beziehung zueinander zu setzen. Damit ist diese ‚alles erklärende Theorie‘ für die moderne Geologie von so zentraler Bedeutung wie die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie für die Physik oder die Evolutionstheorie für die biologischen Wissenschaften. Diese Theorie, die die Entstehung, den Aufbau und die relativen Bewegungen der sog. tektonischen Platten erklärt, etablierte sich aber erst vergleichsweise spät, nämlich in den 1960er und 1970er Jahren.

Dennoch gehen erste Hinweise auf das Phänomen der Platten-Bewegungen auf die Renaissance-Zeit zurück, als der niederländische Kartograph **Abraham Ortelius** (1527-1598) als Erster erkannte, dass die Umrise der Kontinente (etwa die Westküste Afrikas und die Ostküste Südamerikas) zusammenpassen. Trotz dieser und weiterer Beobachtungen und Hypothesen im Laufe der darauffolgenden Jahrhunderte blieb bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts der sog. **Fixismus** (der von einer unveränderlichen Lage der Kontinente ausging) die dominante Sicht der Erdwissenschaftler. **Alfred Wegener** sammelte und publizierte (1915) - wie kein anderer vor ihm - sehr detaillierte Evidenz für die ‚**Kontinentaldrift**‘ (Kontinentalverschiebung) und nannte den früheren Großkontinent, aus dem die heutigen Kontinente hervorgingen, **Pangäa**. Wegeners Theorie wurde jedoch noch Jahrzehnte lang nicht allgemein akzeptiert, weil sie keinen plausiblen Mechanismus für diese Kontinent-Verschiebungen bot. Erst durch die Nutzung einiger im 2. Weltkrieg entwickelter Technologien – wie etwa der Sonar/Echolot-Messungen oder der Erfassung feinsten Abweichungen im Erdmagnetfeld – konnte ab den 1950^{er} und 1960^{er} Jahren ein Durchbruch erzielt werden. So wurde festgestellt, dass in der Mitte der Ozeane eine insgesamt über 60.000 km lange Unterwasser-Gebirgskette existiert, der sog. **Mittelozeanische Rücken**

(MOR), an dem basaltische Gesteinsschmelzen (u.a. in Form von Kissenlava) ständig neuen Ozeanboden bilden. Am MOR gehen die tektonischen Platten also auseinander (je nach MOR mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 bis zu ca. 17 Zentimetern pro Jahr). Diesen Prozess nennt man **Ozeanbodenspreizung** (*Englisch: seafloor spreading*). Damit entfernen sich die zu diesen Platten gehörenden Kontinente im Laufe der Jahrtausende voneinander (z.B. Südamerika und Afrika oder Nordamerika und Eurasien durch die allmähliche Verbreiterung des Atlantiks). Da die Erdoberfläche insgesamt eine konstante Größe hat, muss die Ozeanboden-Bildung durch ‚Verschwinden‘ von Plattenmaterial an anderer Stelle kompensiert werden. Dies geschieht durch **Subduktion**, einen Vorgang, bei dem eine ozeanische Platte unter eine andere ozeanische Platte, oder unter einen Kontinent, in den darunter liegenden Erdmantel ‚eintaucht‘. Breite Evidenz für Subduktion wurde in den 1960^{er} und 1970^{er} etabliert (etwa durch das Vorhandensein von Tiefseerinnen in solchen Zonen (z.B. die ca. 11.000 m tiefe **Marianenrinne** vor der gleichnamigen Inselkette im westlichen Pazifik). Seit der breiten Anerkennung der Plattentektonik hat die bis heute sehr intensive Forschung im Bereich der geologischen Wissenschaften das Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse und Konsequenzen der Plattendynamik erheblich erweitert und verfeinert. Dies begründet den in diesem Vortrag verwendeten Begriff ‚Plattentektonik 2.0‘.

Im Folgenden sollen ein paar grundlegende, für das Verständnis der Plattentektonik wichtige Fakten erläutert werden. Die äußerste Schale der Erdkugel ist in sog. **Lithosphären-Platten** unterteilt, die jeweils aus einem ozeanischen oder kontinentalen **Krustenanteil** und dem darunter liegenden **lithosphärischen Mantel**. Zwischen beiden Lagen (also Kruste und lithosphärischem Mantel), die sich in ihrer chemischen/mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden (s.u.), liegt die sog. Mohorovičić-Diskontinuität (**‚Moho‘**, die damit die Grenze zwischen Kruste und Mantel markiert). Trotz ihrer Unterschiede verhalten sich beide Lagen wie eine mechanische Einheit als feste Lithosphären-Platten.

Manche Lithosphären-Platten sind sehr groß, wie etwa die Pazifische Platte (ca. 100.000.000 km²), die Nordamerikanische Platte (ca. 76.000.000 km²) oder die Eurasische Platte (ca. 68.000.000 km²), manche z.T. deutlich kleiner. Mit Ausnahme der Pazifischen Platte haben zumindest alle großen Platten sowohl

(1) einen geologisch gesehen relativ **jungen ozeanischen Anteil** (bis maximal ca. 180 Millionen Jahre alt, da ozeanische Platten irgendwann wieder subduziert werden), als auch (2) einen größtenteils **älteren kontinentalen Anteil** (ca. 70% der kontinentalen Kruste sind älter als 2,5 Milliarden Jahre; allerdings sind diese alten Gesteine nur an einigen Stellen an der Erdoberfläche aufgeschlossen, für die meisten Menschen sind nur die zuoberst liegenden, deutlich jüngeren Sedimentschichten sichtbar und erfahrbar; Sedimente machen aber nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtmasse der kontinentalen Kruste aus).

Die **ozeanische Kruste** ist ca. ca. 5-8 km dick, weist einen relativ einheitlichen, einfachen Aufbau auf und besteht größtenteils aus ‚basischem‘ (relativ SiO₂-armem), basaltischem Material (Basalt, Dolerit, Gabbro) mit einer mittleren **Dichte von ca. 2,9 g/cm³**. Dagegen ist die **kontinentale Kruste** dicker (ca. 35 km im Durchschnitt, bis zu 70 km unter dem Himalaya) und ist (nicht zuletzt durch Gebirgsbildung) sehr komplex strukturiert; insgesamt hat die

kontinentale Kruste eine ‚saure‘ (SiO_2 -reichere), granitische Zusammensetzung (dies schließt auch metamorphe Gesteine wie Gneise ein), insbesondere in ihren oberen $2/3$, und hat eine Gesamtdichte von **ca. $2,8 \text{ g/cm}^3$** . Der unter der Kruste liegende **lithosphärische Mantel** hat – im Durchschnitt – eine Dichte von ca. $3,3 \text{ g/cm}^3$. Somit liegt die *gesamte* Dichte der Lithosphäre (also der Einheit aus Kruste und lithosphärischem Mantel) unter $3,3 \text{ g/cm}^3$ und ist dementsprechend geringer als die Dichte der darunter liegenden **Asthenosphäre ($3,2 - 3,3 \text{ g/cm}^3$)** (die Asthenosphäre gehört, wie der lithosphärische Mantel, zum oberen Erdmantel). Hinsichtlich der Dichte bildet die ozeanische Lithosphäre in Subduktionszonen eine Ausnahme, die eine Dichte über $3,3 \text{ g/cm}^3$ erreicht, was ihr ‚Eintauchen‘ (Subduktion) in die Asthenosphäre bedingt. An dieser Stelle ist es wichtig hervorzuheben, dass *kontinentale* Lithosphäre – im Gegensatz zu *ozeanischer* Lithosphäre – aufgrund ihrer deutlich geringeren Dichte nicht subduziert werden kann (zumindest nicht tief); dies erklärt die oben erwähnte Tatsache, dass der größere Teil der kontinentalen Kruste sehr alt (Jahrmilliarden alt) werden kann und im Laufe der Erdgeschichte – bis heute – immer angewachsen ist.

Die **Asthenosphäre** (griech. für ‚schwache Sphäre‘) ist in seiner Gesamtheit betrachtet ein Festkörper. Jedoch enthält die Asthenosphäre einen geringen Anteil an Gesteinsschmelzen ($\sim 1\%-5\%$), was seine relative Verformbarkeit im Vergleich zur festen Lithosphäre erklärt; diese Verformbarkeit liegt u.a. am ‚Schmiereffekt‘ eines geschmolzenen Films zwischen den Mineralkörnern des asthenosphärischen Gesteins.

Unter den **Mittelozeanischen Rücken** (MOR) bilden sich größere Schmelzkörper durch Druckentlastung der Asthenosphäre. Diese Magmen gelangen aufgrund ihrer geringeren Dichte nach oben, wo sie sich schließlich am Ozeanboden (ca. 2000-2500 m unter dem Meeresspiegel) als Kissenlava ergießen bzw. tiefer in der Lithosphäre z.B. als Gabbro und noch tiefer (unterhalb der Moho) als lithosphärischer Mantel erstarren. So wächst ozeanische Lithosphäre im Laufe der Jahrmillionen beiderseits des MOR (Ozeanbodenspreizung) und trägt somit auch zum Auseinanderdriften der Kontinente bei. Die ‚Geburt‘ eines MOR geschieht ursprünglich durch punktuelle Ausdünnung der Lithosphäre eines Kontinents oder einer ozeanischen Platte, gefolgt von einer **Grabenbildung** (wie etwa beim ostafrikanischen Grabensystem) und einem Aufstieg von Magmen und dem damit verbundenen Vulkanismus. Dauert dieser Prozess lange genug an, sinkt der Grabenboden unter den Meeresspiegel und es entsteht ein **neuer Ozean**.

Je mehr die erstarrten **Gesteine der ozeanischen Lithosphäre** sich vom MOR entfernen (und je älter sie also werden), umso mehr **kühlen sie sich ab** und verdichten sich. Dies bedingt wiederum zwei Phänomene: erstens eine allmähliche **Versenkung des Ozeanbodens** – unter Bildung der Tiefsee-Ebene (*Engl. **abyssal plain***) zwischen MOR und Kontinentrand, einem zwischen 3000 und 6000 m unter der Meeresoberfläche liegenden Bereich, der etwa 40% der gesamten Erdoberfläche ausmacht und somit die häufigste – wenn auch noch weitgehend unerforschte – Landschaftsform unseres Planeten bildet. Zweitens, wenn die Dichte der Ozeanischen Lithosphäre durch Abkühlung die der darunter liegenden Asthenosphäre übersteigt, kann es zur **Subduktion** des ozeanischen Plattenanteils kommen.

Bei der Subduktion wird der Druck, der auf der immer tiefer sinkenden ozeanischen Platte lastet, immer größer. Damit **zieht die Subduktion zwei wichtige Prozesse nach sich**. Zum einen wird aus dem subduzierten Ozeanboden das an Minerale gebundene Wasser ‚herausgepresst‘ und gelangt in die Asthenosphäre, wo es eine Teilschmelze induziert. Das geschmolzene Material steigt seinerseits bis zur darüber liegenden Oberplatte und gelangt hier durch Spalten und Kluftsysteme weiter nach oben, z.T. bis an die Oberfläche, wo Vulkane ausbrechen. Diese Vulkanausbrüche sind also Teil des sog. **Subduktions-bedingten Magmatismus**. Bei seinem Aufstieg durch die Lithosphäre kann das Magma eine **Schmelzendifferenzierung** erfahren, bei der aus ursprünglich asthenosphärischen, ultrabasischen Schmelzen allmählich saurere Schmelzen entstehen, aus denen letzten Endes nach ihrer Erstarrung leichtere (weniger dichte) Gesteine entstehen (z.B. Granit als Tiefengestein oder Rhyolith als vulkanisches Gestein). Dieser Prozess trägt zum **Nettowachstum der kontinentalen Kruste** bei.

Der zweite Vorgang, der sich aus der Subduktion und er damit verbundenen Drucksteigerung in der Unterplatte ergibt, ist eine **Hochdruckmetamorphose**. Hierbei kann im ehemaligen Ozeanboden etwa der **Eklogit** entstehen, das dichteste Silikatgestein, das an der Erdoberfläche gefunden werden kann (Dichte ca. $3,3 - 3,6 \text{ g/cm}^3$). Hierdurch nimmt auch die Gesamtdichte der subduzierten Platte zu und zieht diese immer stärker nach unten; der damit noch verbundene Rest der ozeanischen Platte, der als Ozeanboden noch an der Oberfläche liegt, wird dabei weiter Richtung Subduktionszone (also weiter vom MOR weg) horizontal gezogen. Dieser als **Plattenzug** (*Engl. slab pull*) bezeichnete Prozess wird heutzutage als die möglicherweise wichtigste treibende Kraft der Plattenbewegungen angesehen.

Die fortschreitende Verdichtung und das zunehmende Gewicht der subduzierten Platte führen dazu, dass der Versenkungswinkel dieser Platte mit der Zeit steiler wird. Dieses als **Zurückrollen** der subduzierten Platte genannte Phänomen (*Engl. slab roll-back*) übt auf die Subduktionszone (und die in ihr liegende Tiefseerinne) eine Sogwirkung aus, so dass diese sich ozeanwärts verlagert (also in die Richtung, aus der die subduzierende Platte kommt). Gleichzeitig wird durch diesen Sog die Oberplatte horizontal gedehnt, was deren Ausdünnung bewirkt und hier einen neuen MOR entstehen lassen kann (wie am Beispiel des **Lau-Beckens** im Bereich der **Tonga**-Inselkette gezeigt wurde).

Ein interessanter und wichtiger Fall der Plattenbewegung ergibt sich, wenn die subduzierende ozeanische Platte einen Kontinent sozusagen ‚im Schlepptau‘ hat und diesen gegen eine kontinentale Oberplatte kollidieren lässt. Die Kollision wird im Übrigen nach neuesten Erkenntnissen nicht nur durch den Plattenzug, sondern auch durch das Zurückrollen der ozeanischen Platte angetrieben. Bei solchen **Kontinent-Kontinent-Kollisionen** entstehen neue Gebirgsketten wie die Alpen oder der Himalaya. Die für junge Gebirge charakteristische Hebung geschieht nicht etwa durch Faltungen, sondern durch eine (z.T. sehr komplexe) **Stapelung** der Schichten beider kollidierender Kontinente und durch den damit verbundenen **isostatischen Ausgleich**. Es handelt sich hierbei um eine Art Archimedes-Prinzip, das zur Heraushebung der gestapelten kontinentalen Kruste aufgrund ihrer geringeren Dichte auf der darunter liegenden, dichteren Asthenosphäre führt – analog

einem Eisberg auf dem Meer. Der isostatische Auftrieb (und damit die Hebung) der kontinentalen Kruste wird allerdings zunächst deutlich eingeschränkt, weil die subduzierte ozeanische Platte noch damit verbunden ist und sie nach unten zieht. Da die kontinentale Lithosphäre aber letzten Endes nicht mit subduziert werden kann, kommt es irgendwann zum Abriss der subduzierten Platte (**Platten-Abriss**, Engl. **slab break-off**). Während Letztere alleine weiter durch die Asthenosphäre sinkt, kann die isostatische Hebung des Gebirges nun in vollem Umfang stattfinden.

Durch Einsatz der sog. **seismischen Tomographie** ist es in den letzten zwei Jahrzehnten möglich geworden, Strukturen in und auch weit unterhalb der Lithosphäre zu erfassen. Dies hat u.a. die Erkenntnis erbracht, dass zumindest Reste von subduzierten **Platten bis an die Kern-Mantel-Grenze** (also bis zu einer Tiefe von ca. 2900 km) gelangen können, wie das etwa am Beispiel der **Farallon-Platte** gezeigt wurde, die seit (mindestens) dem Mitteljura unter den Westrand von Nord, Mittel- und Südamerika subduziert wird. Einer neuesten Hypothese zufolge könnten diese Plattenreste durch eine Wechselwirkung mit zwei riesigen Strukturen an der Kern-Mantelgrenze, den sog. Large Low Shear Velocity Provinces (die als **Jason- und Tuzo-Beulen** bezeichnet werden) sogar an der Entstehung von Plumes (Manteldiapiren) und Superplumes beteiligt sein, die z.T. enorme Mengen an heißem Gesteinsmaterial aus dem tieferen Mantel an die Erdoberfläche transportieren.

Globale Plattenbewegungen und die Verschiebung von Kontinenten und kleineren Plattenelementen, und die Subduktion ozeanischer Lithosphäre, haben spätestens im Archaikum vor ca. 3 Milliarden Jahren begonnen. Durch diese Plattentektonik haben sich einige Male auch **Superkontinente** gebildet (die für eine Zeit alle oder fast alle Landmassen der Erde in sich vereinigten, wie vor ca. 1200-750 Millionen Jahren **Rodinia** oder vor ca. 320-160 Millionen Jahren **Pangäa**). Durch Auseinanderbrechen von Pangäa sind die heutigen Kontinente entstanden, die sich in Zukunft (in ca. 200-250 Millionen Jahren) wiederum in einer anderen Konstellation zu einer **Pangäa proxima** wieder vereinigen werden.

Schließlich hat die Weltraumforschung sich in den letzten Jahrzehnten auch mit der Geologie anderer Himmelskörper in unserem Sonnensystem dank z.T. spektakulärer Bilder, Gesteinsanalysen und Messungen befassen können und gezeigt, dass **mindestens 9 Planeten bzw. Monde geologisch aktiv** sind, mit etwa Vulkanismus, Geysiren oder z.T. überraschend komplexen Oberflächenstrukturen (Venus, Erde, Mars, die Jupiter-Monde Io und Europa, die Saturn-Monde Enceladus und Titan, der Neptun-Mond Triton und der Zwergplanet Pluto). Allerdings geht man heute davon aus, dass nur die Erde eine globale Plattentektonik mit horizontalen Plattenbewegungen und einer kontinentalen, SiO₂-reichen Lithosphäre aufweist, während andere Himmelsobjekte eine insgesamt starre, wenig bewegliche, basaltische Lithosphäre (bzw. Eisdecken) besitzen („stagnierende“ Lithosphäre, Engl. **stagnant lid**). Nichtsdestotrotz erweisen sich geologische Phänomene im Sonnensystem als ausgesprochen vielfältig und hochinteressant, wie z.B. das Vorhandensein von Wasserozeanen unter den Eisdecken von Europa oder Enceladus, die möglicherweise geeignete Bedingungen für extraterrestrisches Leben bieten.