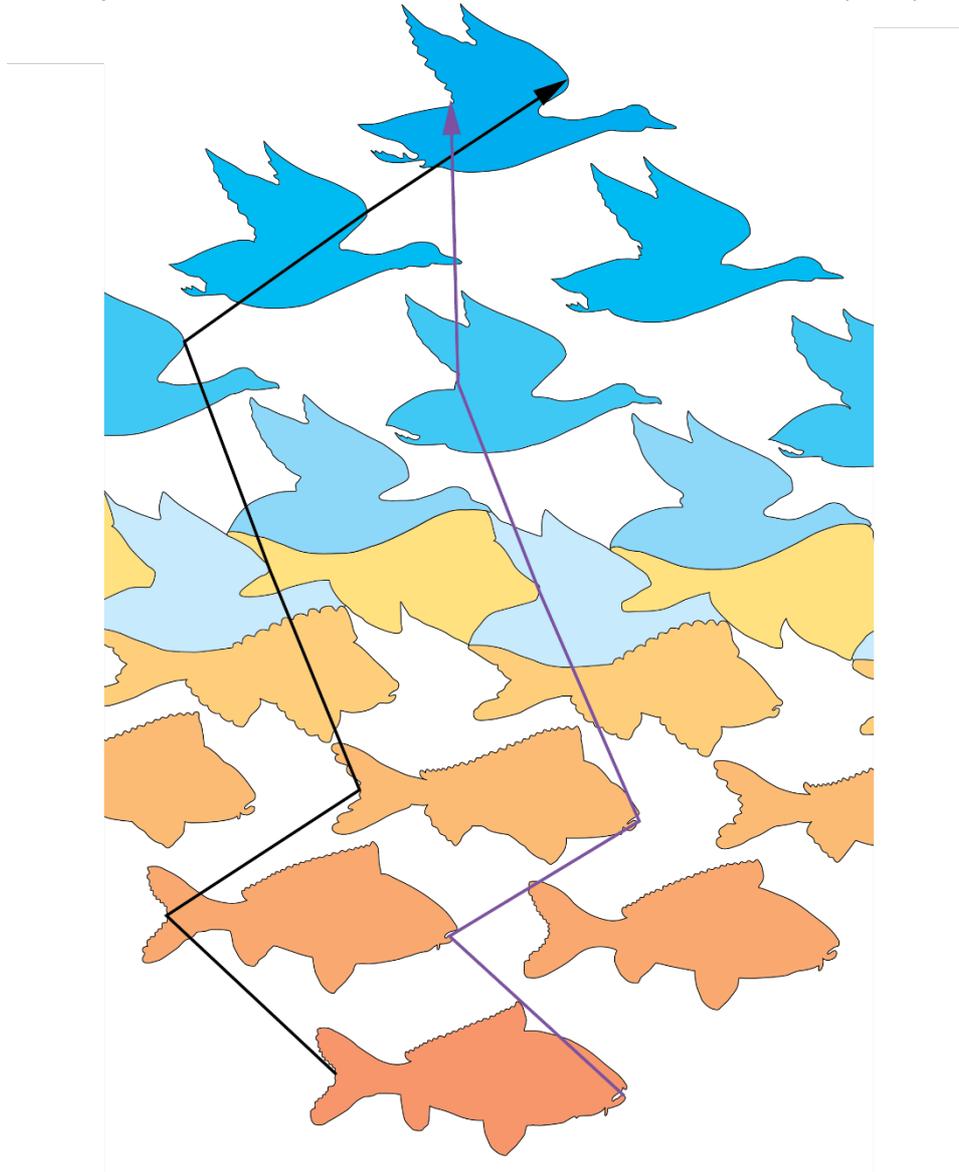


# EINFÜHRUNG IN DIE STRUKTURGEOLOGIE

Strukturgeologen interessieren sich für geologische Prozesse, durch welche eine Krafteinwirkung eine Form in eine andere umwandelt. Diese Veränderung wird als **Deformation** (*deformation*) bezeichnet. Um dies kurz zu erläutern, betrachten wir das Kunstgemälde von Maurits Escher. Er "spielte" mit der **Deformation**, indem er einen Fisch in einen Vogel verwandelte und so den Übergang vom Wasser zur Luft fand. Lassen Sie uns seine künstlerische Metamorphose einmal näher betrachten, indem wir uns überlegen, worauf sich Deformation eigentlich bezieht. Es wird davon ausgegangen, dass sich jeder einzelne Punkt in der Form relativ zu den anderen bewegt.

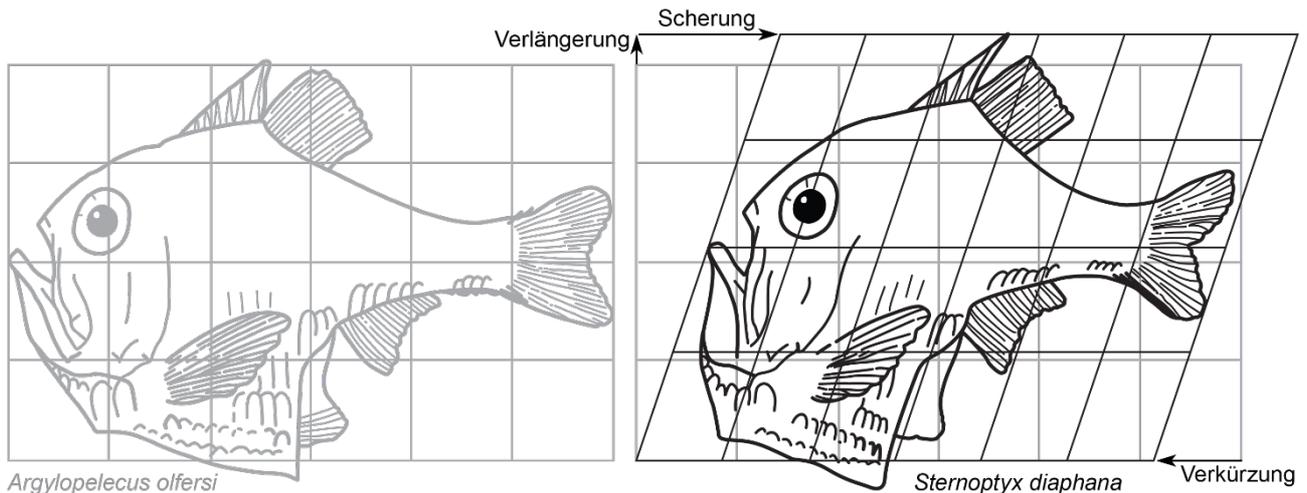
Inspiziert von *Lucht en water I*, Maurits Cornelis Escher (1938)



Jeder Punkt folgt seinem eigenen, unabhängigen Weg. In der Abbildung bewegt sich der Schwanz entlang des schwarzen Vektors, das Maul bewegt sich entlang des violetten Vektors. Diese Vektoren werden als **Trajektorien** (*trajectories*) bezeichnet. Wir brauchen nicht jedes einzelne Stadium entlang der Vektoren zu bestimmen, um die Gesamtbewegung jedes einzelnen Punktes und die daraus resultierende Deformation, in der Geologie **Endzustand** (*finite state*) genannt, zu verstehen. Allerdings ist es wichtig, die Zwischenstadien zu identifizieren; umso besser kann die Deformationsgeschichte, in unserem Beispiel vom Fisch zum Vogel, verstanden werden. Die

vertikale Organisation dieser Transformation führt zu einem anderen bedeutenden Punkt in der Geologie: Direkte Beobachtungen sind meist auf Gesteinen beschränkt, die in den äusseren 20-30 km der Erde gebildet und verformt wurden, sagen wir die oberen Gänse. Jedoch tragen tiefere Prozesse, wie Änderungen in der Fischebene, zur nahen Oberflächenverformung und zu Strukturen bei.

Die Studie von D'Arcy Wentworth Thompson ist die wohl faszinierendste Arbeit, die sich gestalterisch gesehen mit der Deformation befasst. Der Biologe erkannte die Rolle der physikalischen Gesetze und der Mechanik in der Evolution von biologischen Formen und schlug vor, dass Veränderungen und Verknüpfungen zwischen den Arten einfachen mathematischen Funktionen folgen. Sein Genius lag darin, Ordnung in der Vielfalt von "organischen und anorganischen, lebendigen und leblosen Sachen ..." zu schaffen.

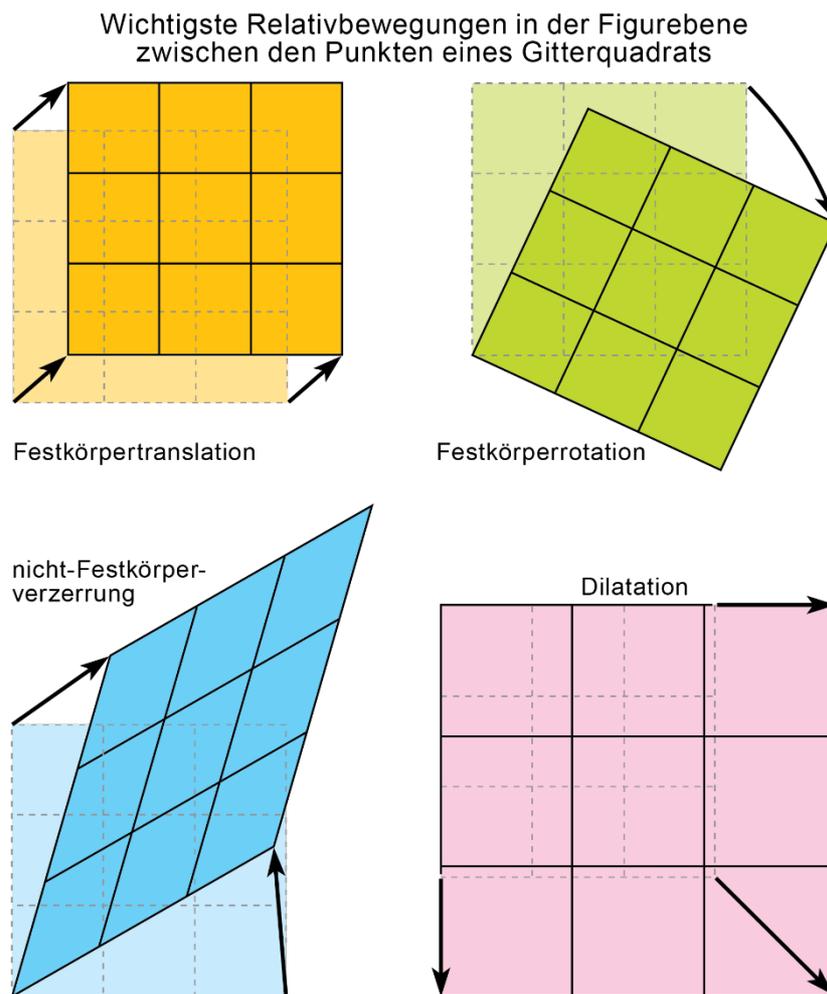


Verformung an einem biologischen Beispiel: Umwandlung von *Argyropelecus olfersi* zu *Sternoptyx diaphana* (nach D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*, 1917)

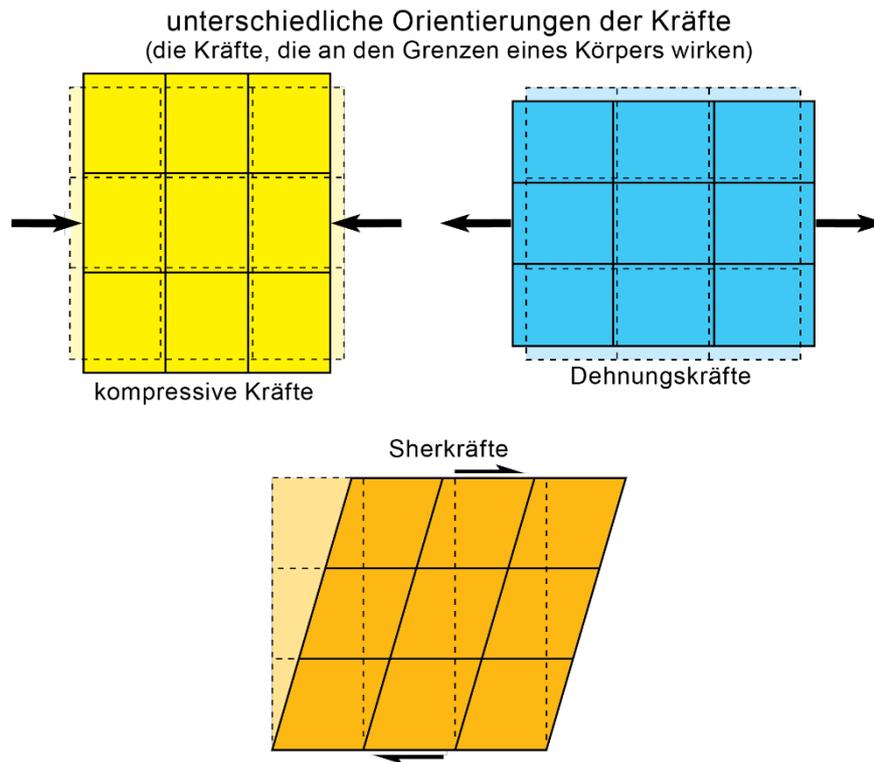
Das Aufgabengebiet der Strukturgeologen ist das Erkennen, Beschreiben und die quantitative Bestimmung, sowie auch das Erstellen einer Interpretation der ursprünglichen Form des Gesteines zu dessen Endform. Aus diesem Grund muss die Geometrie der geologischen Strukturen sorgfältig und exakt beschrieben werden, bevor Rückschlüsse über deren Bildung und deren Umwandlung gezogen werden können. Strukturgeologische Arbeiten beziehen sich auf die Mechanik und sollten, wie in der Physik, analytische Aspekte mit einbeziehen:

- Die **geometrische Analyse** der ursprünglichen und abschliessenden Formen befasst sich mit der Orientierung, der Grösse und der Morphologie der Strukturen. Diese erste Zuordnung zeigt, dass Strukturgeologie im Wesentlichen eine Beobachtungsmethode ist. Die direkte Beobachtung berichtet sichtbare Merkmale in aufgeschlossenen Gesteinen, Satellitenbildern, Bohrkernen und Experimenten; indirekte Beobachtung nutzt Merkmale von geophysikalischen (Seismik, Gravimetrie, Magnetismus) Bildgebungen. Die geometrische Analyse hält Objekte für mechanisch **statisch**. Die komplexen geologischen Strukturen werden aus Gründen der Vereinfachung in Flächen und Linien zerlegt und Interpretationen in geologischen Profilen konstruiert. Die geometrische Analyse macht die Strukturgeologie zu einer der zentralen Disziplinen der Geowissenschaften: Sie enthüllt die Architektur der Erde, während die lokale Geometrie eine wichtige Kenntnis für Öl, Wasser und Bergbau als auch für Erdbeben- und Erdstocherung ist.
- Die **kinematische Analyse** (*kinematic analysis*) beschreibt die Bewegung von Elementen innerhalb eines Gesteines. Die relative Bewegung von Punkten, die zu einer Struktur gehören, belegt die fortschreitende Entwicklung dieser Struktur mit der Zeit, von ihrer ursprünglichen Form zu ihrer deformierten Form, ohne dabei die Kräfte zu berücksichtigen, die verantwortlich sind für die Bewegung. Solch eine Beschreibung erfordert den Entwurf von Instrumenten, um

Bewegungsprozesse auf der Erde zu messen, aufzuzeichnen und vorauszusagen. Bei diesem Unterfangen ist der Bezugsrahmen entscheidend. Die grundlegenden Bewegungen sind **Translation** (Veränderung der Position), **Rotation** (Veränderung der Orientierung), **Verzerrung** (Veränderung der Form, *distortion*) und **Dilatation** (Veränderung der Grösse, *dilation*). Diese sind meistens miteinander kombiniert, um eine natürliche Deformation zu erzeugen. Translation und Rotation sind Bewegungen eines Körpers, wobei dieser intakt bleibt ohne Veränderung der Form oder Grösse; dies wird als **Festkörperdeformation** (*rigid-body deformation*) bezeichnet. Im Gegensatz dazu kommt es bei einer **nicht-Festkörperdeformation** (*non-rigid body deformation*), zur Verzerrung und/oder Dilatation. Letztendlich verbindet die **Kinetik** (*kinetics*) die Kräfte mit der daraus resultierenden Bewegung.



- Die **dynamische Analyse** (*dynamic analysis*) befasst sich mit den Kräften, die für die Bewegung des Gesteins und innerhalb dessen verantwortlich sind. Mit anderen Worten setzt sich die dynamische Analyse das Ziel, die Orientierung und Grösse der auftretenden Kräfte oder Spannungen mit den mechanischen Faktoren, die die Entwicklung der Struktur kontrollieren, zu beschreiben. Erste Überlegungen beziehen sich häufig auf die Analyse der Körper unter der Annahme eines **statischen Gleichgewichtes** (*static equilibrium*). Dies erfordert mathematische Hilfsmittel, um geringfügige Kräfte mit ihren fühlbaren Effekten zu verbinden.



- Die **rheologische Analyse** (*rheological analysis*) versucht die Deformationsraten und das Verhalten des deformierten Materials, auf das eine Kraft angewandt wurde, zu verstehen. Die Analyse erfordert Instrumente, um die physikalischen Eigenschaften der auf der Erde vorkommenden Materialien zu messen.

Diese vier Aspekte beziehen unterschiedliche wissenschaftliche Ansätze und Techniken mit ein: **Beobachtung** (um die Geometrie in jedem möglichen Massstab zu bestimmen), **Experimente** (um die Geometrien unter kontrollierten Laborbedingungen physikalisch zu reproduzieren) und **Modellierung** (um die Geometrien, durch die Anwendung von theoretischen Gesetzen nachzuvollziehen).

## Strukturen

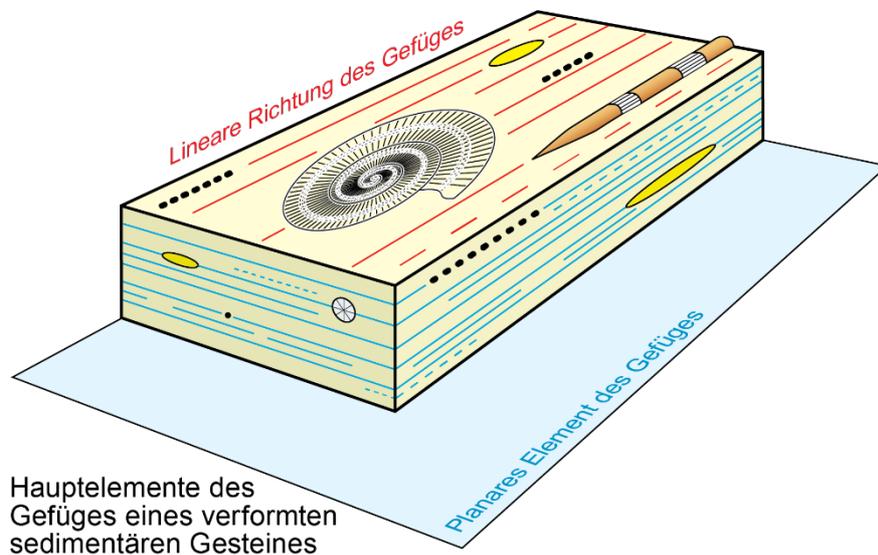
Gesteinsformen und andere Erscheinungen, die den Geologen anzeigen, dass Verformung stattgefunden hat, werden **Strukturen** genannt (d.h. Strukturen im strukturgeologischen Sinn). Diese Strukturen variieren in der Grösse von  $10^{-6}$ m (Atomgrösse) bis  $10^6$ m (die Grösse der Erde und anderer Planeten).

- **Makrostrukturen** sind gross ( $> 10^2$ m).
- **Mesostrukturen** kann man noch mit dem blossen Auge in Aufschlüssen und Gesteinsproben ( $10^2$  bis  $10^3$ m) erkennen.
- **Mikrostrukturen** sind Erscheinungen, die mit dem optischen oder dem Elektronenmikroskop beobachtet werden können ( $< 10^{-2}$ m).

Sowohl durch Studien an natürlichen Strukturen, die Strukturgeologen im Gelände beobachten und beschreiben, als auch durch Mikrostrukturen, die Geologen in natürlich deformierten Gesteinen beobachten und aus experimentell deformierten Proben erhalten, wird sich den geometrischen Problemen angenähert. Finden Geologen deformierte Gesteine, wollen sie natürlich auch wissen, wie sich diese Strukturen in den Untergrund fortsetzen. Dies hilft dem Auffinden von unterirdischen Reservoirs, wie Öl, Wasser, Metallen oder von wertvollen Mineralen. Wie jedes geometrische Merkmal werden die geologischen Formen durch **Flächen** (*planes*), die eben oder gebogen sind, und durch **Linien** (*lines*) beschrieben.

Die wissenschaftliche Möglichkeit, einfache und komplexe Strukturen in Gesteinen zu entschlüsseln, zu beschreiben und sie in eine verwendbare Form zu bringen, ist das Privileg der **Strukturgeologie**. Die Strukturgeologie basiert auf einer beschreibenden Analyse von Strukturen und Gefügen. Das **Gefüge** (*fabric*) eines Objektes ist die geometrische Verteilung und die Beziehung zwischen sich regelmässig und durchweg wiederholenden Bestandteilen, unabhängig vom Massstab. Im Gegensatz dazu kann sich ein Gefüge auch durch das vereinzelte Auftreten von Strukturen oder durch eine Wiederholung von Strukturen entwickeln. Das Gesteinsgefüge spiegelt eine Anzahl von Prozessen wider, die auf das Gestein einwirkten.

- - Das **primäre Gefüge** bildet sich während der Entstehung des Gesteins. Primäre Strukturen wie Schrägschichtung oder gradierte Schichtung spiegeln die lokalen Umweltbedingungen wider, in welchen sich die Gesteine bildeten.
- - **Sekundäre Gefüge** entstehen während der Deformation. Sie spiegeln das Verhalten des Gesteins bezüglich verschiedener auf ihn einwirkender Kräfte, wie auch die lokalen Bedingungen während der Deformation des Gesteins wider.



Geologen berechnen die Richtungen, in denen die Gesteine im Untergrund weiter verlaufen, durch die Bestimmung von deren primären und sekundären Oberflächenstrukturen.

## Verformung

Die quantitative Bestimmung in den Veränderungen von Form und/oder Volumen durch die Deformation bildet den Schwerpunkt der **Verformungsanalyse** (*strain analysis*). Alle Änderungen in der Grösse oder Form eines Körpers, oder beides zusammen, erzeugen **Verformung** (*strain*). Verformung wird gemessen als das Verhältnis von der Zunahme oder Abnahme einer geometrischen Dimension zur Originallänge dieser Dimension. Z.B.:

Lineare Verformung	=	Streckung (oder Verkürzung) der Länge / Originallänge
Volumenverformung	=	Zunahme (oder Abnahme) des Volumens / Originalvolumen
Scherverformung	=	Scherverschiebung / Dicke

## Zeit

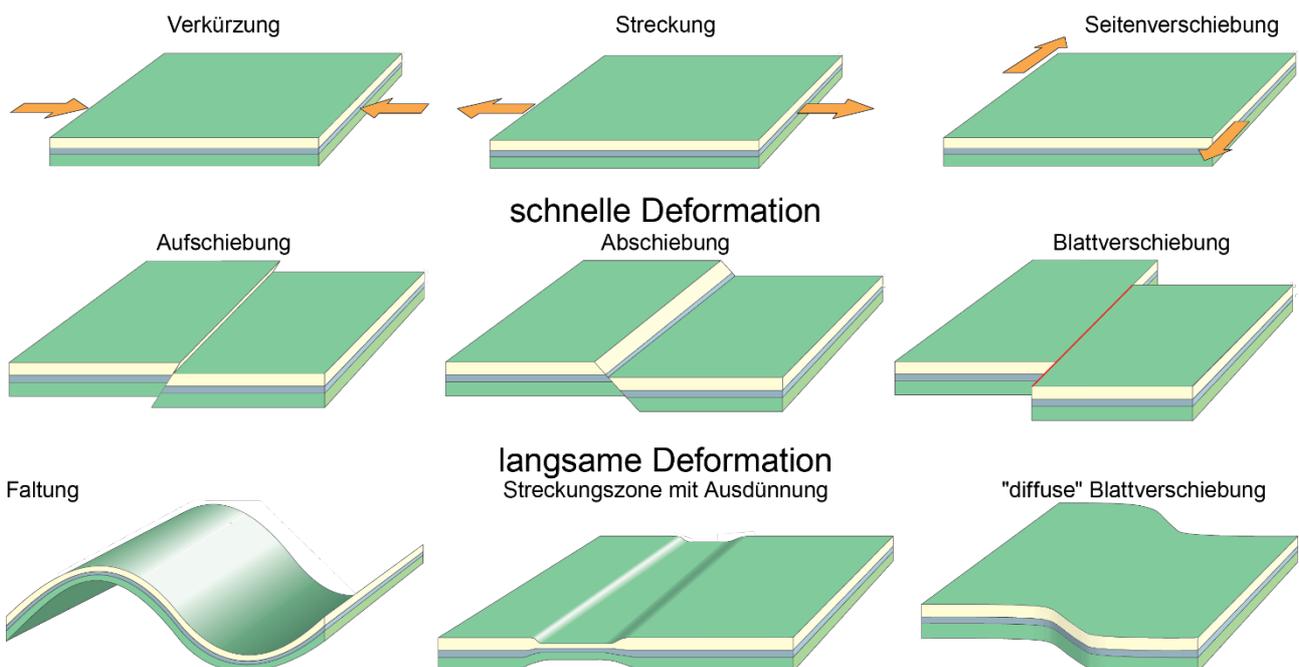
Lassen Sie uns zurückgehen, zum Beispiel die Umwandlung eines Fisches in einen Vogel. Die Aufeinanderfolge der einzelnen Bewegungsschritte entweder des Schwanzes oder des Maules bestimmt eine **fortschreitende** und **kontinuierliche** Entwicklung, wenn die Bewegung langsam ist. Jedoch könnte jede Bewegung von einem Stadium der Umwandlung zum nächsten auch sehr plötzlich sein, mit geringem Einfluss auf das Endergebnis. Genauso kann eine Stufe übersprungen werden oder sogar einen Schritt zurückgehen ohne Einfluss auf das Endergebnis. Einzelheiten der

Trajektorien bleiben ohne grosse Folgen in Bezug auf die Geometrie, aber können sehr wichtige Hinweise für bestimmte Prozesse sein.

In der Geologie umfasst eine langsame Verformung eine Zeitspanne von mehreren hunderttausend Jahren oder sogar Millionen Jahren (normalerweise sind  $10^{15}$ s = 30 Millionen Jahre). Sagen wir einmal, dies sei die Zeitspanne, in der der schwarze Schwanzvektor nahezu parallel zum violetten Maulvektor bleibt. Schnelle Verformung findet innerhalb weniger Zehner-Sekunden statt (nur  $10^{-1}$ s für die Rissbildung im Zusammenhang mit Erdbeben). Dies könnte an der Stelle sein, wo die Vektoren sich kreuzen und eine abrupte Diskontinuität in der langsamen Verformung markieren, indem der Schwanz nach vorne geht und das Maul nach hinten verschoben wird.

### **Schnelle Verformung**

Schnelle Verformung kann sehr dramatisch sein und durch **Erdbeben** (*earthquake*) zum Ausdruck kommen, diesen nahezu unvorhersagbaren Ereignissen, die die menschliche Fantasie seit Beginn unserer Geschichtsschreibung erschrecken: Ein Erdbeben findet dann statt, wenn die elastische Verformungsenergie eines Teils der Erde plötzlich umgewandelt wird in Bewegungsenergie und zur Verschiebung an einer Bruchfläche führt. Es ist dasselbe, wie wenn man ein Gummiband dehnt, bis es plötzlich reisst und einen an den Fingerspitzen schmerzt. Die Energie wird bei der elastischen Streckung gespeichert und freigesetzt, wenn Bruchbildung auftritt. Während des Erdbebens vibriert die Erde, bricht und Teile davon werden in wenigen Sekunden mehrere Meter weit versetzt (1899 wurde bei Yakutat Bay, Alaska, eine Bucht 15 m über den Meeresspiegel gehoben). Das drittgrösste registrierte Erdbeben war das Beben vor Sumatra mit einer Magnitude von 9.3, welches 2004 einen Tsunami auslöste. Bei dem Beben wurden Gesteine auf einer Länge von 1600 km gebrochen und der Meeresboden wurde an manchen Stellen um 20 m verschoben. Das Bruchereignis, das durch eine plötzliche Deformation erfolgt, hinterlässt auf der Erde Spuren infolge der relativen Bewegung von Gesteinen auf beiden Seiten des **Bruches** (*fracture*), was als Verwerfung (*fault*) bezeichnet wird. Das Ergebnis ist eine scharfe Deformation, wobei die relative Bewegung auf einer sehr engen Fläche konzentriert war und die umgebenden Gesteine zerbrochen oder deformiert wurden. Dies wird als **spröde Deformation** (*brittle deformation*) bezeichnet, da das Gestein lediglich in zwei Blöcke zerbrochen wurde. Über die Verwerfung hinweg besteht keine Kontinuität. Dementsprechend wird die daraus erfolgende Deformation oft als **diskontinuierliche Deformation** (*discontinuous deformation*) bezeichnet.

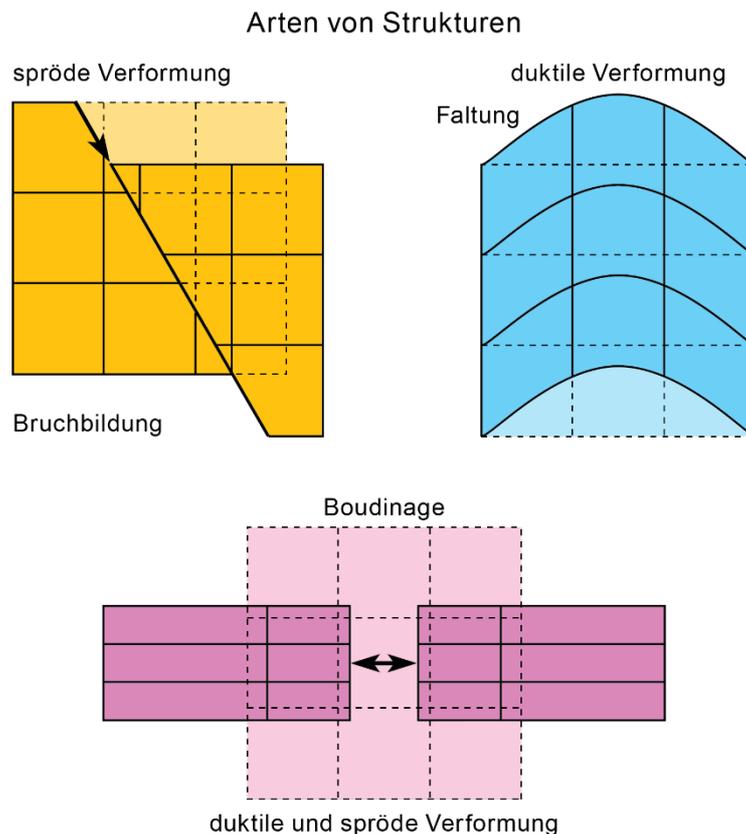


## Langsame Verformung

Eine langsame Verformung ist dagegen für die menschliche Wahrnehmung weniger gut feststellbar. Dort, wo sie sehr aktiv ist, kann sie allerdings mittels geodätischer Messgeräte gemessen werden. Über mehrere Jahre hinweg kann an Orten, an denen sich solche Messgeräte befinden, eine Deformation von den Bezugsdreiecken festgestellt werden, was auf eine Deformation im Untergrund hinweist. Viele Gesteinsformationen enthalten Beweise von Deformation über einen viel grösseren Zeitraum hinweg. Zum Beispiel legt fast jede Gebirgskette steile sedimentäre Schichten frei, die ursprünglich horizontal unter dem Meeresspiegel abgelagert wurden. Tatsächlich scheinen Gesteine über grosse Zeiträume hinweg wie eine Flüssigkeit zu fließen.

**Falten** (*fold*s) zeigen, dass eine Struktur, die ursprünglich eben war, wie zum Beispiel eine Sedimentschicht, ohne zu zerbrechen verbogen wurde. Die Grenze der gebogenen Schicht kann problemlos überall entlang der Falte ohne Unterbruch verfolgt werden. Die Deformation ist in diesem Fall **kontinuierlich**, was faszinierend ist, weil es bedeutet, dass Gesteine plastisch formbar sind.

**Boudinage** (*boudinage*) hingegen zeigt, dass eine ursprünglich ebene Struktur langsam gedehnt wurde, was zu ausgedünnten Bereichen führt (wie wenn dünne Kaugummifäden langsam in die Länge gezogen werden). Boudinage resultiert aus einer Kombination von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Deformation.



Der wichtige Parameter, der auch den Unterschied zwischen schneller und langsamer Deformation ausmacht, ist nicht die Änderung der Form. Die Metamorphose vom Fisch zum Vogel ist lediglich ein geometrisches Problem. Der Zeitraum, über den die Umformung stattfindet, ist sehr wichtig. Die **Verformungsrate** (*strain rate*) ist daher ein wichtiger Parameter in der Gesteinsdeformation.

## Kräfte

Für Geologen ist es wichtig herauszufinden, welche Art von Kraft für die Deformation der Gesteine verantwortlich war und wie viel und auch in welche Richtung die deformierten Gesteine bewegt wurden. Die **Tektonik** befasst sich mit den Kräften und Bewegungen in einem grossen Gebiet, die

zur Bildung der Strukturen beitragen. Tektonik bedeutet folglich regionale Deformation. **Strukturgeologie** konzentriert sich auf Strukturen im submikroskopischen bis regionalen Massstab. Diese zwei Disziplinen sind eng miteinander verbunden, da beide sich mit der Rekonstruktion von Bewegungen und Verformungen, die die Erde gestaltet haben, befassen und da die Tektonik Strukturen erzeugt.

Durch Feldbeobachtungen, Karten und Profile erkannten Geologen schon sehr bald, dass scheinbar feste und steife Gesteine zu Falten verbogen oder an Verwerfungen zerbrochen werden können. Verformung kann auf drei unterschiedliche Orientierungen der **Kräfte** (*force*) zurückgeführt werden:

**Kompressive Kräfte** (*compressive forces*) sind Kräfte, die einen Körper zusammendrücken und verkürzen.

**Dehnungskräfte** (*extensional forces*) sind Kräfte, die einen Körper strecken und eventuell auseinanderreißen.

**Scherkräfte** (*shearing forces*) sind Kräfte, die einem Teil des Körpers, am anderen Teil auf der gegenüberliegenden Seite gestatten vorbeizugleiten.

Gebirge, wie sie zwischen Afrika und Europa auftreten, sind Bereiche, in denen Gesteine gefaltet wurden. Dies weist darauf hin, dass das Gebiet als Folge von Kompression oder durch horizontale tektonische Kräfte über eine lange Zeit deformiert wurde.

Aber womit stehen die horizontalen Kräfte in Verbindung?

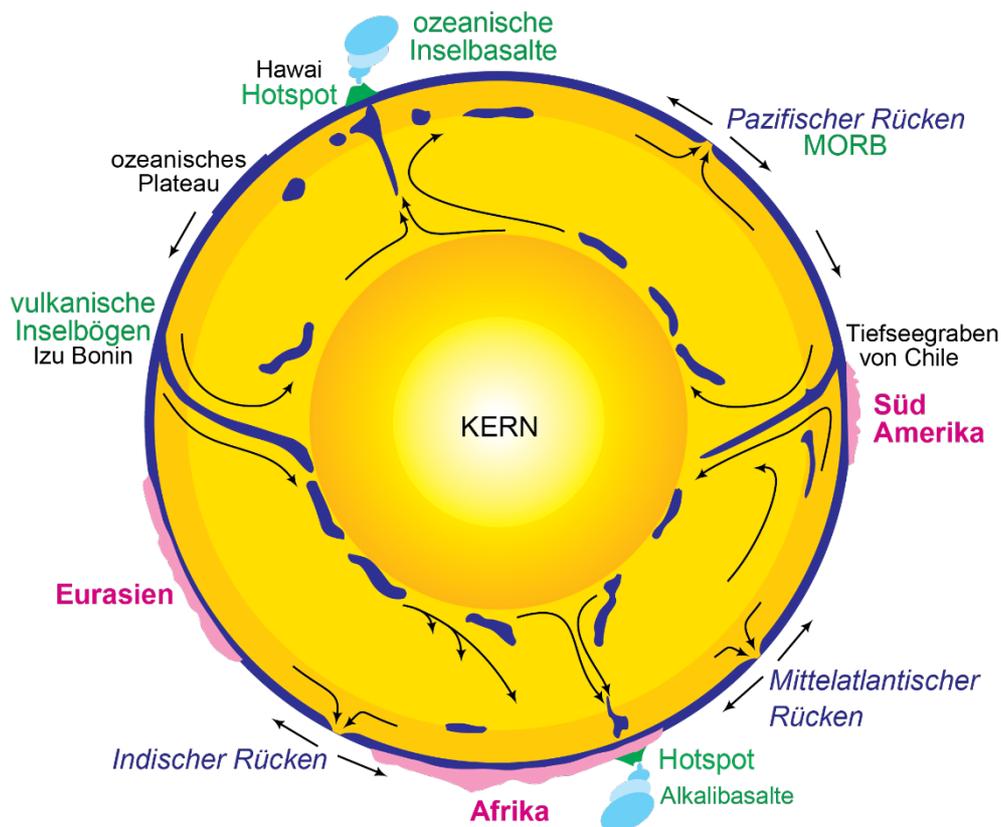
### Plattentektonik

Geologen, die die Verteilung von Gebirgsketten betrachteten, um daraus die kontinentale Verkürzung zu berechnen, und die Orientierung von Strukturen bestimmten, um die Richtung der Kräfte zu ermitteln, stellten grossräumige Bewegungen zwischen den **Kontinentalblöcken** (*continental blocks*) fest. Um diese grossräumigen Bewegungen erklären zu können, begrüßten sie daher die Idee von der **Kontinentaldrift** (*continental drift*), die vom Meteorologen Alfred Wegener um das Jahr 1920 postuliert wurde. Diese Theorie basiert, nach anfänglichen Spekulationen, auf der Beobachtung, dass die im Atlantik gegenüberliegenden Küstenlinien auffallend gut zueinander passen. Aber ausser einigen aufgeschlossenen Wissenschaftlern, die meistens aus Europa und Australien kamen, waren viele Geologen nicht bereit, grosse horizontale Bewegungen von kontinentalen Teilen der Erdoberfläche zu akzeptieren, weil es keine rationale Erklärung gab, um die Kontinente aufzuspalten und zu trennen. Stattdessen glaubten die meisten Geologen, dass Kontinente episodisch aus den Ozeanen auftauchten und wieder versanken. Grundlage für diese Idee waren die weit verbreiteten marinen Fossilien in den kontinentalen Sedimenten. Die Ursache dafür war, dass die Geologen die Kontinente untersuchten, wohingegen Hinweise, die eindeutig für den Mechanismus der Kontinentaldrift sprachen, aber im Ozean verborgen lagen.

### Das Musterbeispiel der Plattentektonik

In den 1960er Jahren führte die Entdeckung der mittelozeanischen Rücken und der magnetischen Streifenmuster auf den Ozeanböden zur Bestätigung, dass sich die Kontinente durch den Mechanismus der **Ozeanbodenspreizung** (*sea floor spreading*) tatsächlich bewegen. Das quantitative Wissen über die Art und Altersverteilung der ozeanischen Kruste lieferte eine komplette Theorie über die Dynamik der Erde. Ozeanbodenspreizung beinhaltet, dass die neue ozeanische Kruste kontinuierlich von Schmelzen, die in die mittelozeanischen Rücken eindringen, gebildet wird. Durch den kontinuierlichen Nachschub von Schmelze bewegt sich die Kruste kontinuierlich vom Rückenzentrum weg. Somit befindet sich die jüngste Kruste im Zentrum des mittelozeanischen Rückens, während die älteste ozeanische Kruste an den kontinentalen Rändern zu finden ist. In der Tat wurde die ozeanische Kruste an den gegenüberliegenden afrikanischen und südamerikanischen Rändern zur selben Zeit in der Kreide gebildet, und demzufolge lagen diese Ränder zur Zeit ihrer

Entstehung nebeneinander. Der Motor, der die Platten verschiebt, ist die Mobilisierung des Mantels durch Ableitung der inneren Energie eines Planeten. Konvektionsströme steigen vom Erdmantel nach oben und breiten sich dann beidseitig von **Grabensystemen** und **ozeanischen Rücken** aus. Dadurch werden die Kontinente beiseitegeschoben und ozeanische Becken werden geöffnet. Da die Erde Zeit ihres Bestehens einen stabilen Radius aufweist, muss die Erzeugung der neuen Kruste an den Rücken durch die Zerstörung der Kruste ausserhalb des Rückens ausgeglichen werden. **Herdflächenlösungen** (*focal mechanisms*) von tiefen Erdbeben zeigen das Absinken von ozeanischer Lithosphäre (**Subduktion**) entlang von kontinentalen Rändern, die von Tiefseerinnen umgeben werden. Folglich sind die Tiefseerinnen die Orte, an denen der Meeresboden vernichtet wird. Somit wird die Balance zwischen der Produktion und der Vernichtung von ozeanischer Kruste aufrechterhalten.



Hypothetische Fließlinien im konvektiven Mantel mit Lithosphären- Platten und -Fragmenten sowie Mantel-"Plumes"

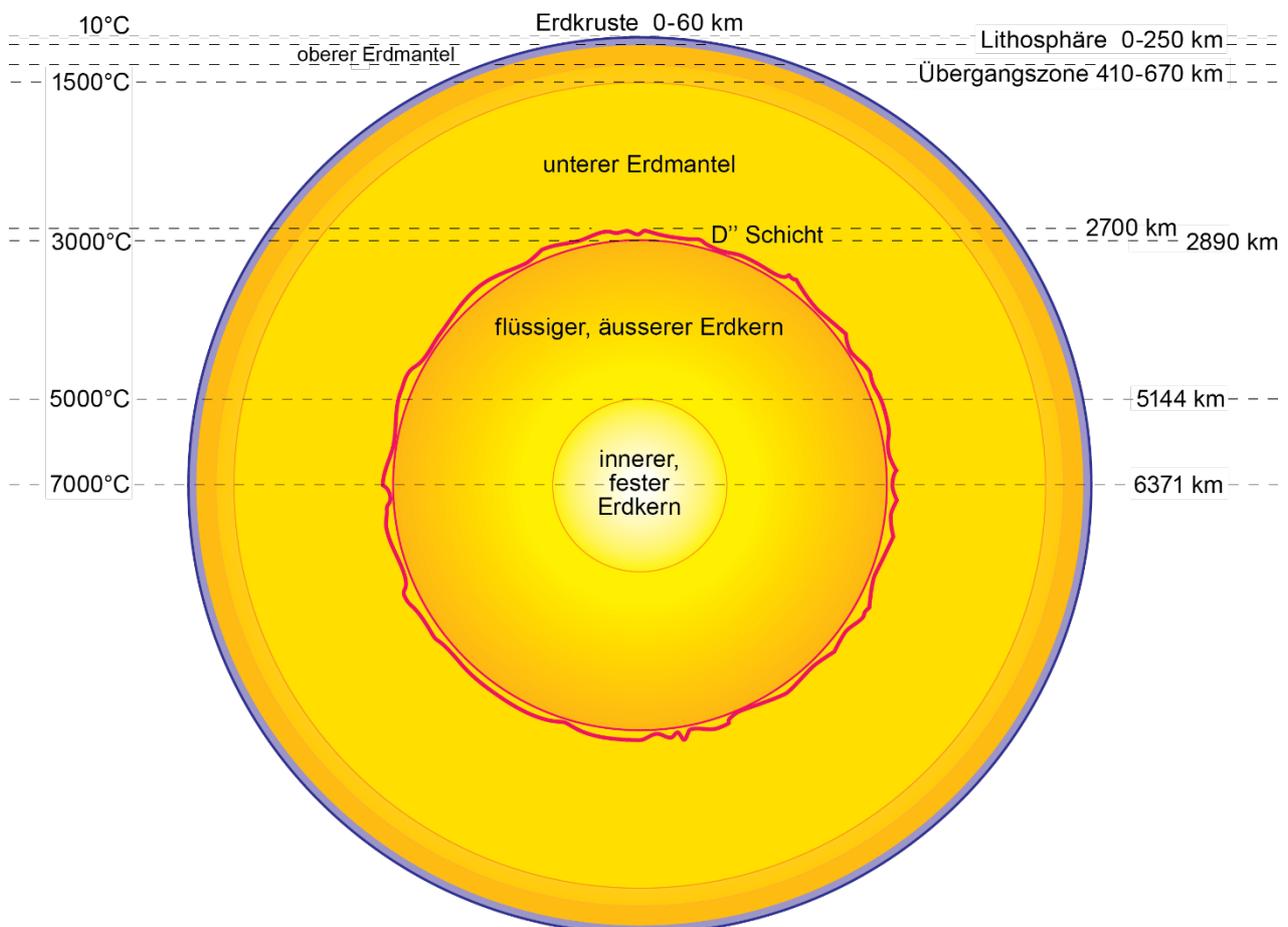
Die Beweise für die **Plattenbewegungen** (*plate movements*) vereint die Erdwissenschaften durch die Eingliederung von unterschiedlichen Theorien in eine globale Erklärung für viele unabhängige Beobachtungen aus der Geologie, Geophysik und der Geochemie. Seither, und trotz einiger Gegner dieser Theorie, bleibt die **Plattentektonik** (*plate tectonics*) das einfachste und das am besten fundierte Konzept, um geologische und geophysikalische Strukturen, wie auch Strukturen an der Oberfläche mit den Bewegungen und den Prozessen, die im Inneren der Erde auftreten, in Verbindung zu bringen. Der Mechanismus der Plattentektonik, der die Ozeanbodenspreizung und die Subduktion miteinander verbindet, kann jetzt für die letzten 200 Millionen Jahre (d.h. nur die letzten 4 % der Erdgeschichte) als gesichert angenommen werden. Dieses Alter entspricht der ältesten ozeanischen Kruste. So ist die alte Geschichte des Planeten (bis zu ca. 4 Ga) nur in kontinentalen Gesteinen aufgezeichnet. Die paläomagnetischen, geochemischen und geologischen Daten neigen zu der Annahme, dass Plattentektonik seit mindestens 3.1 Ga aktiv ist. Die Prozesse, die zur Öffnung von ozeanischen Becken infolge der Auftrennung von Kontinenten führen und umgekehrt, Prozesse, die zur Bildung von Gebirgen infolge der Schliessung von Ozeanen führen und somit neue Kontinente bilden, werden

insgesamt als **tektonischer Zyklus** (*tectonic cycle*) bezeichnet. Die Rekonstruktion der Platten aus vergangenen Zeiten ist ein Schlüsselforschungsthema, um die Genese und das Vorkommen von Naturschätzen und Gefahren sowie auch die klimatische und Umweltentwicklung des Planeten mit geologischen Prozessen und der Manteldynamik zu verknüpfen.

### Konzeptuelle Schlussfolgerungen

Die Theorie beinhaltet fünf wesentliche Konzepte:

- Die Erde hat einen Lagenbau.
- Die äussere Lage der Erde (die **Lithosphäre**; *lithosphere*) ist verhältnismässig kälter, dichter und fester als die tiefere **Asthenosphäre** (*asthenosphere*); die Lithosphäre ist zerteilt in Stücke, bestehend aus festen Einheiten von variabler Form und Grösse, die **Platten** (*plates*) genannt werden. Die meisten Platten (derzeit 12 grosse Platten) bestehen aus kontinentaler und ozeanischer Lithosphäre.
- Die Platten bewegen sich unabhängig voneinander als feste mechanische Einheiten. Die Bewegung ist ähnlich der Bewegung von treibenden Flüssen oder der von Treibeis auf Wasser. Genauso schwimmen die Platten im Wesentlichen auf der schwachen Asthenosphäre; sie sind in einem sogenannten **isostatischen** Zustand (*isostasy*).
- Erdbeben und vulkanische Eruptionen sind in schmalen Gürteln konzentriert, die linearen topografischen Anomalien entsprechen. Diese Verteilung der seismischen und topografischen Anomalien stellt starke tektonische Aktivität an oder nahe den Plattengrenzen bildlich fest.
- Das Innere der Platten ist geologisch relativ ruhig, mit viel weniger Erdbeben als an den Plattengrenzen und wenig vulkanischer Aktivität. Jedoch können die Spannungen, die an den Plattengrenzen angelegt werden, über grosse Distanzen innerhalb der Platten übertragen werden.



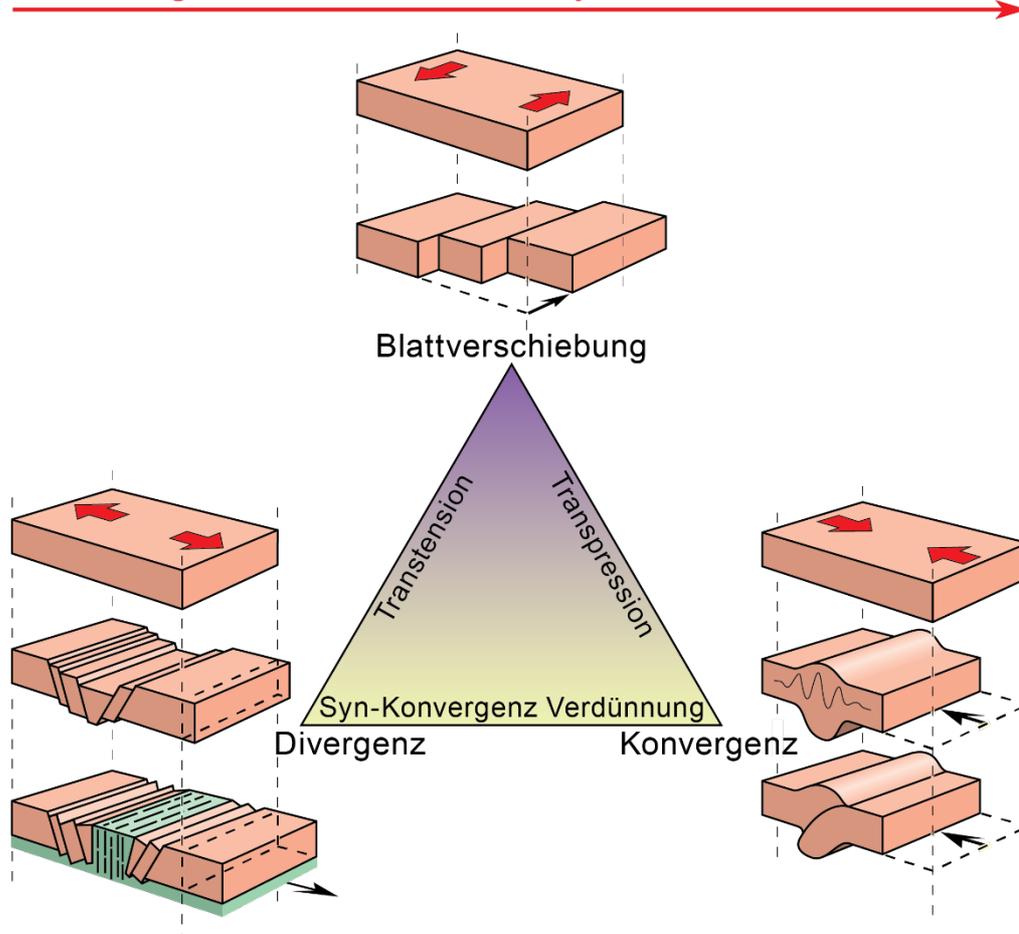
Schalenförmiger Aufbau und Temperaturen in der Erde

Die Plattentektonik hat Anteil an jedem Aspekt der Erdwissenschaften. Plattentektonik führt zu Katastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüchen, Erdbeben und Tsunamis, ist aber auch hilfreich für natürliche Ressourcen (wie Minerallagerstätten, Kohlenwasserstoffe, Wasser, Geothermie). Sie formt auch Landschaften, die unser Leben bereichern. Es ist daher wichtig, die Mechanismen und die Strukturen, die mit der Plattenbewegung verbunden sind zu verstehen.

### Bewegliche Erde

Die tektonische Kinematik, die sich mit der Relativbewegung und der zeitlichen Entwicklung beschäftigt, ist dank der magnetischen Aufnahme der Ozeanböden aus paläomagnetischen Daten relativ genau bekannt. Seit den 1990ern werden mittels der Raumgeodäsie nahezu "live" die relativen Bewegungen zwischen Krustenblöcken gemessen. Die Plattenbewegungen werden in einfachen geometrischen Bezeichnungen definiert, die in der beschreibenden Strukturanalyse und in sowohl kinematischen als auch dynamischen Analysen verankert sind. Die Stärke der Theorie der Plattentektonik liegt in ihrer Fähigkeit, den Typ, die Magnitude und die Richtung der heutigen und vergangenen relativen Plattenbewegungen, über Plattengrenzen hinweg überall auf der Welt zu erklären und vorherzusehen sowie auf viele geologische Ereignisse Bezug zu nehmen.

zunehmende Energie,  
die benötigt wird um tektonische Systeme aufrecht zu erhalten



### Die drei Hauptbewegungen der lithosphärischen Platten

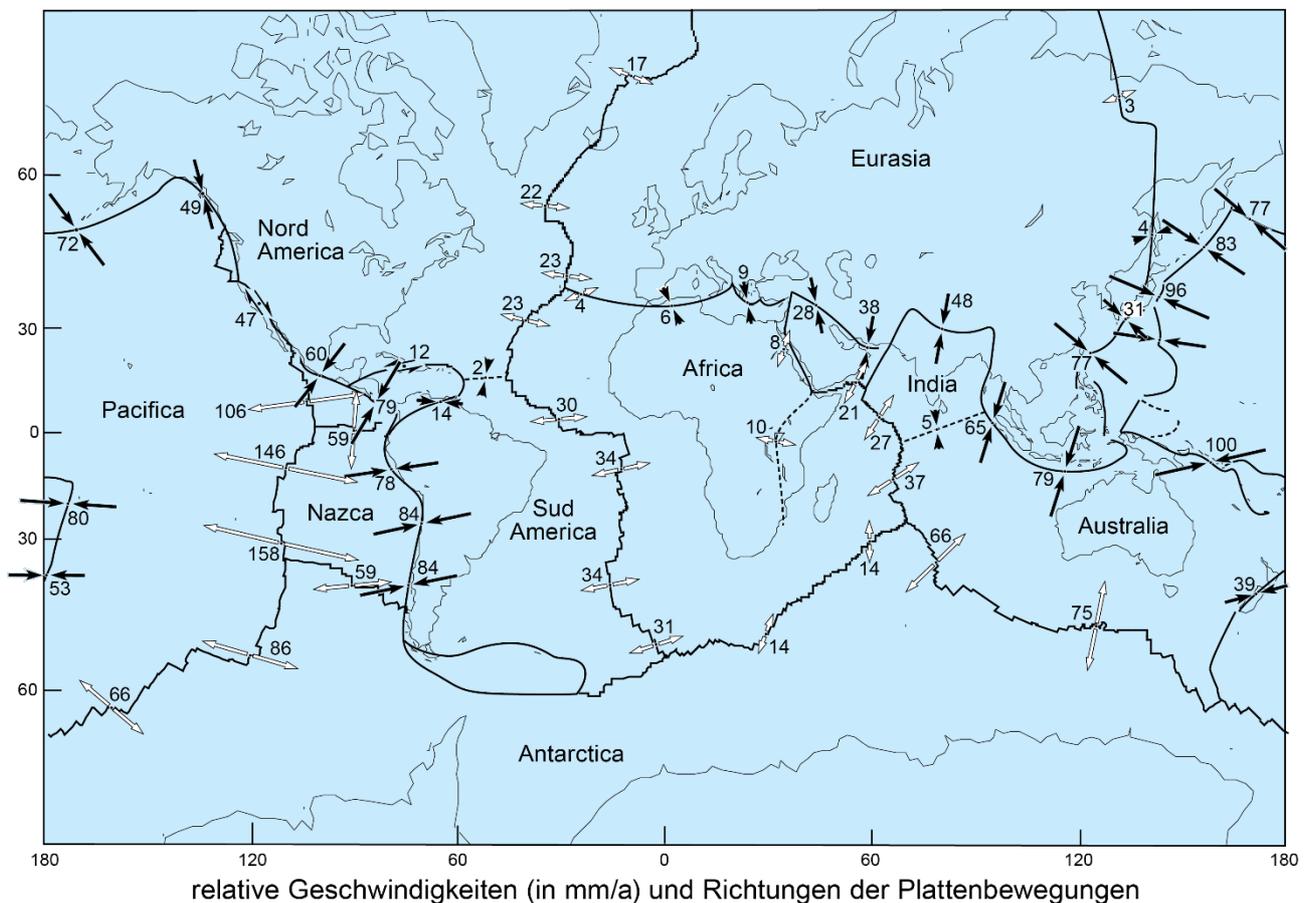
Plattengrenzen sind entsprechend ihrem Bewegungstyp in drei Klassen eingeteilt:

- **Konvergenz** (*convergence*) bringt angrenzende Platten aufeinander zu. Die Gesamtkrustenfläche wird verringert und die Platten können entlang von **Subduktionszonen** (*subduction zones*) in

den Mantel abtauchen. **Kompression** (*compression*) dominiert an **konvergenten Plattengrenzen** (*convergent plate boundaries*), an denen Platten miteinander **kollidieren** (*collide*).

- **Divergenz** (*divergence*) tritt auf, wenn benachbarte Platten sich voneinander weg bewegen. Diese Trennung öffnet eine Lücke, in der neue Ozeankruste gebildet wird und die Platten wachsen. **Dehnung** (*tension*) dominiert an **divergenten Plattengrenzen** (*divergent plate boundaries*), an denen Platten sich voneinander weg bewegen.
- **Blattverschiebung** (*strike-slip*) resultiert aus dem seitlichen Verschieben einer Platte bezüglich einer anderen Platte in horizontaler Richtung, ohne dass sich die Platten dabei voneinander weg- oder aufeinander zu bewegen. **Scherung** (*shearing*) dominiert an **Transform-Plattengrenzen** (*transform plate boundaries*), an denen Platten horizontal aneinander vorbeigleiten.

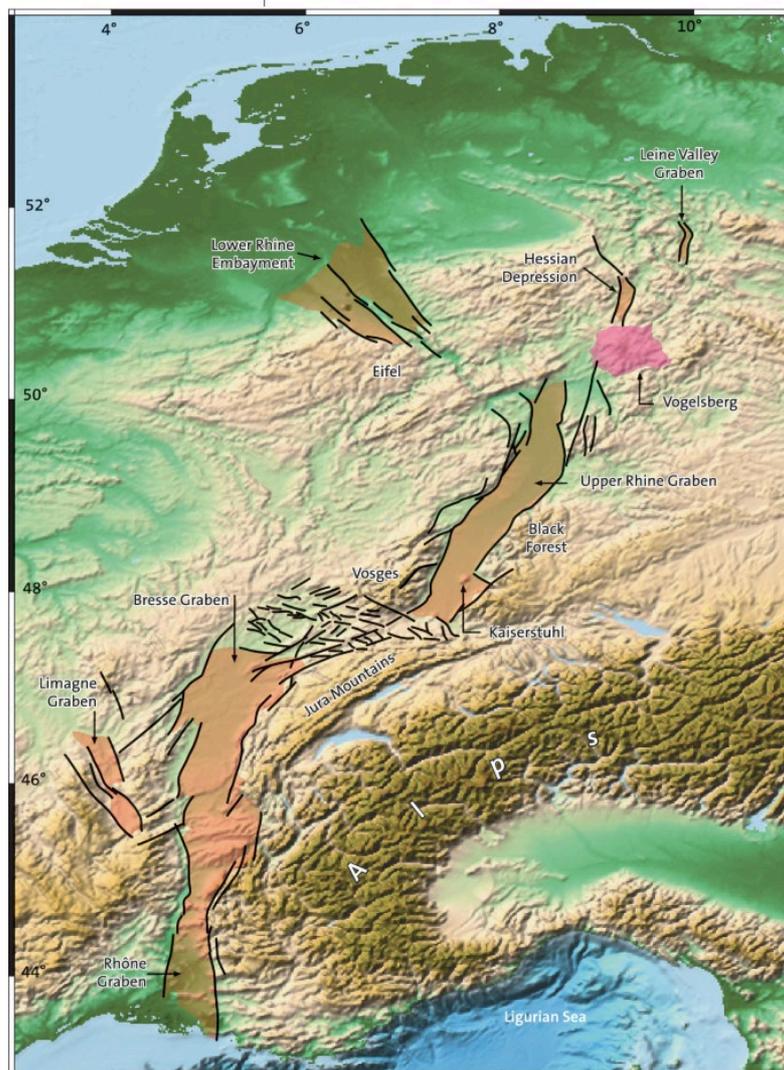
Plattengrenzen sind nicht örtlich festgelegt; sondern sie bewegen sich. Das globale Mosaik aller Platten reorganisiert sich regelmässig und neue Plattengrenzen bilden sich, während andere vernichtet werden. Die Bewegung der Lithosphären erzeugt wenig Spannung in der darunter liegenden Asthenosphäre, weil die Asthenosphäre sehr schwach ist. Andererseits sind Lithosphären stark genug, um Spannungen über weite Abstände zu übertragen. Die daraus entstehenden Strukturen haben geografische Ausmasse und treten sowohl auf dem Ozeanboden als auch auf dem Kontinent in Form einer Topografie auf Landkarten in Erscheinung. Wir können ohne weiteres erkennen, dass die Topografie das Ergebnis horizontaler Bewegungen ist, die bis zu 10 cm pro Jahr erreichen können und ebenso von vertikalen Bewegungen, von bis zu 10 mm pro Jahr, was ein Unterschied von einer Grössenordnung ist. Dementsprechend werden die horizontalen Relativbewegungen zwischen den Platten für die Strukturen, die uns interessieren, wichtiger sein. Zu gegebener Zeit werden wir die um eine Grössenordnung kleineren vertikalen Bewegungen auch berücksichtigen müssen.



Plattenbewegungen können auf viele Arten kombiniert werden, abhängig von der Art der Platteninteraktion, die aufgenommen werden muss. Die tatsächliche relative Bewegung zur Plattengrenze kann senkrecht oder schief sein. Eine schiefe Konvergenz der Platten produziert eine **transpressive Deformation** (*transpressive deformation*). Eine schiefe Divergenz wird **Transtension** (*transtension*) benannt. Da sich die Erde nicht erheblich erweitert, ist die Rate der Lithosphärenvernichtung an den konvergenten Grenzen praktisch dieselbe wie die Rate der Lithosphärenbildung an den divergenten Grenzen.

Die Schlussfolgerung für Strukturgeologen ist, dass die Strukturen existieren, weil die Kruste unseres Planeten dynamisch ist: Die Kruste ist eine dünne, feste Haut, welche ein bewegliches Inneres verbirgt. Die Anzahl der Platten, ihre Größe, die Bewegungsrichtungen und die Geschwindigkeiten haben sich während der Entwicklung der Erde kontinuierlich verändert. Die Bewegungsraten zwischen den einzelnen Platten erhält man, indem die Breiten einer magnetischen Anomalie durch die Zeit geteilt werden. Die daraus resultierenden Raten für die ozeanische Kruste aus dem Tertiär und Quartär stimmen überein mit den Bewegungsraten, die über die Satellitengeodäsie festgestellt wurden. Folglich, bewegten sich die Platten in der Vergangenheit mit einer ähnlichen Geschwindigkeit wie die Platten sich heute bewegen. Das Verstehen der alten Plattentektonik aus der geologischen Überlieferung bleibt ein aktives Forschungsfeld und ob das heutige Modell auf die frühe Geschichte der Erde angewandt werden kann, steht zur Debatte.

## Topographie und moderne Deformation



Topographie des Holozän-Gebirges und der Gräben in Westeuropa nach Neukirchen, F. (2022).

[https://doi.org/10.1007/978-3-031-11385-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11385-7_6)

**Landformen** (*landforms*) sind einzelne Elemente einer Landschaft. Geomorphologie ist die Studie der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die Landformen produzieren.

Das heutige Oberflächenrelief kann zum grössten Teil mit der Deformation, die über die letzten 10Ma Jahre erfolgte, in Verbindung gebracht werden. Es zeigt überzeugend, dass die Topografie Ausdruck der starken und jungen tektonischen Aktivität ist.

Nun wissen wir, dass **Gebirge** die topografische Folge von kontinentaler Deformation sind. **Oberflächenerhebung** (*surface elevation*) tritt im Wesentlichen dort auf, wo zwei Platten konvergieren und letztendlich zusammenstossen, wie in den Alpen zwischen Afrika und Europa oder dem Himalaja zwischen Indien und Asien. Wir finden in beiden Gebirgen **Ophiolite**, Relikte ehemaliger Ozeane, die heute verschwunden sind. Dies ermutigt uns, plattentektonische Lösungen auch auf alte Gebirge anzuwenden, in denen wir Ophiolite finden können.

Gleichermassen wissen wir, dass auch lange **Riftsysteme** die topographische Folge von kontinentaler Deformation darstellen. Beispiele für Riftsysteme finden sich in Ostafrika oder entlang des Rheingrabens. **Oberflächensenkung** (*surface depression*) tritt im Wesentlichen dort auf, wo zwei tektonische Platten divergieren und bei genügend grossen Dehnbewegungen zur Bildung einer neuen ozeanischen Kruste führen. Beispiele eines Riftsystems, welches zur Neubildung einer dünnen, ozeanischen Kruste mit magnetischen Anomalien führte, finden wir im Afar - Roten Meer Riftsystem. Letzteres begann als Riftsystem im Miozän (vor ungefähr 25 Millionen Jahren) und bildete die erste ozeanische Kruste im Plio-Pleistozän (vor ca. 1,5 Millionen Jahre).

Die tektonischen Kräfte können auf Bewegungen im Erdinneren zurückgeführt werden. Letzteres wird in der Geophysik behandelt. Geologen hingegen haben keinen direkten Zugang mehr in die tieferen Erdbereiche. Sie sind einerseits an Landformen als Funktion von tektonischen Prozessen interessiert und andererseits, wie man Landformen zur Rekonstruktion der tektonischen Geschichte benutzt. Zum Beispiel können die morphologischen Anpassungen an die aktive Tektonik an örtlichen Merkmalen wie z.B. Flussterrassen untersucht werden, die durch Erosion und Ablagerungen entstanden sind.

## Prozesse und physikalische Parameter

Ein wichtiges Kennzeichen der modernen Strukturgeologie ist die Einführung von experimentellen Techniken. Experimente können in drei verschiedene Typen eingeteilt werden: **Deformationstests** (*deformation experiments*), **skalierte Modelle** (*analogue models*) und **numerische Modelle** (*numerical models*).

### Deformationstests

Deformationstests untersuchen das Verhalten und die Resonanz des Gesteines unter künstlich kontrollierten Bedingungen, um dessen Eigenschaften zu bestimmen. Diese Information wird aus physikalischen Deformationstests im Labor gewonnen, die eher als ein Test als ein Experiment zu bezeichnen sind. Zwei Hauptverhalten können beobachtet werden:

**Bruch** (*fracture*), bezeichnet Deformation mit dem Verlust der Kohäsion

**Fliessen** (*flow*), bezeichnet jede Deformation ohne Kohäsionsverlust. Duktilität ist die Fähigkeit des Materials zu fliessen, ohne dabei zu zerbrechen.

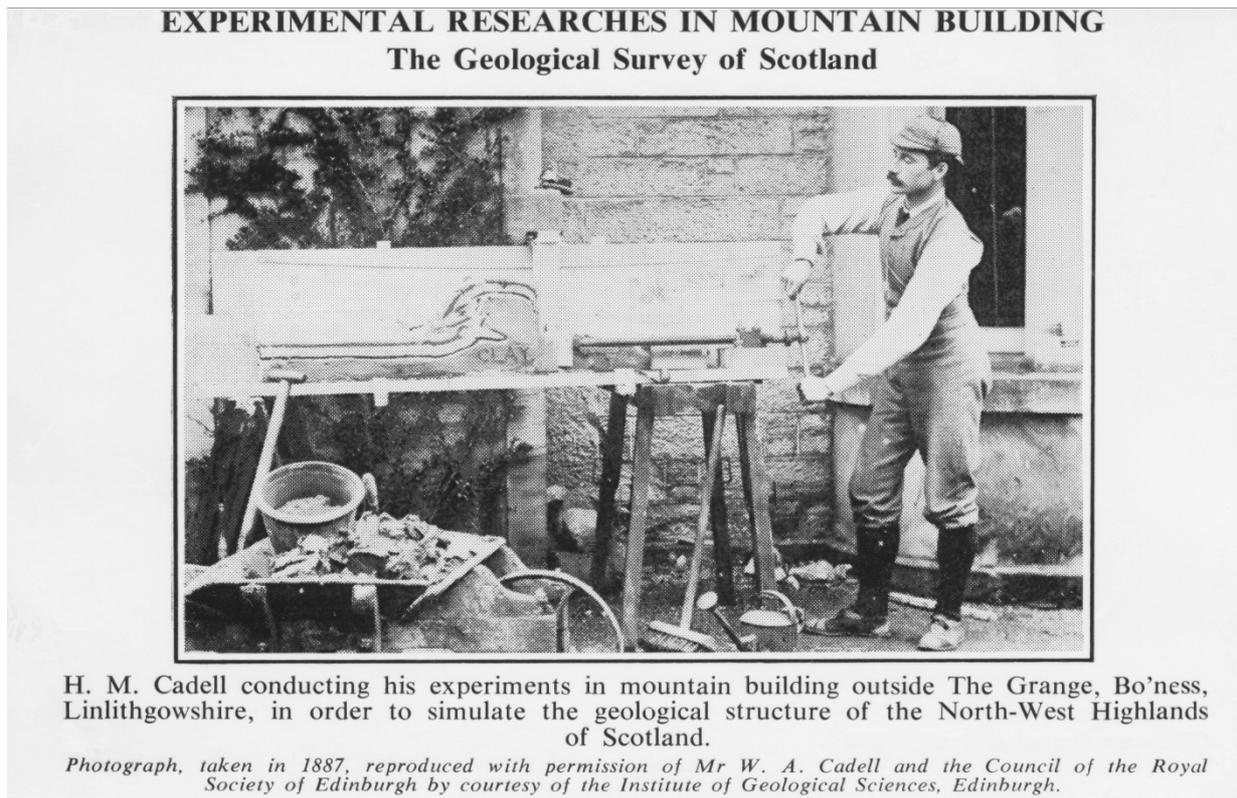
Solche Experimente ermöglichen einen ersten Kontakt mit der **Rheologie** (*rheology*) von geologischen Materialien. Die Rheologie ist das Gebiet, das sich mit der Beziehung zwischen Spannung und Verformung in einem deformierten Material beschäftigt. Im Detail befasst sich die Rheologie damit, wie sich das Material während der Deformation verhält. Dies wiederum ist stark abhängig von verschiedenen Parametern. Diese Parameter steuern letztendlich den Stil der Strukturen, die das Ergebnis sind aus der Kraft, die auf die **Erdkruste** (*crust*) angewandt wird.

Das Wort **Kruste** sollte betont werden, weil Plattentektonik die Bewegung **lithosphärischer Platten** beschreibt, andererseits Geologen aber nur den krustalen Teil der **Lithosphäre** studieren

können. Wie dem auch sei, die Kruste ist der obere Teil, der auf der Erdoberfläche dominiert und mit dem sich Geologen befassen.

### Skalierte Modelle

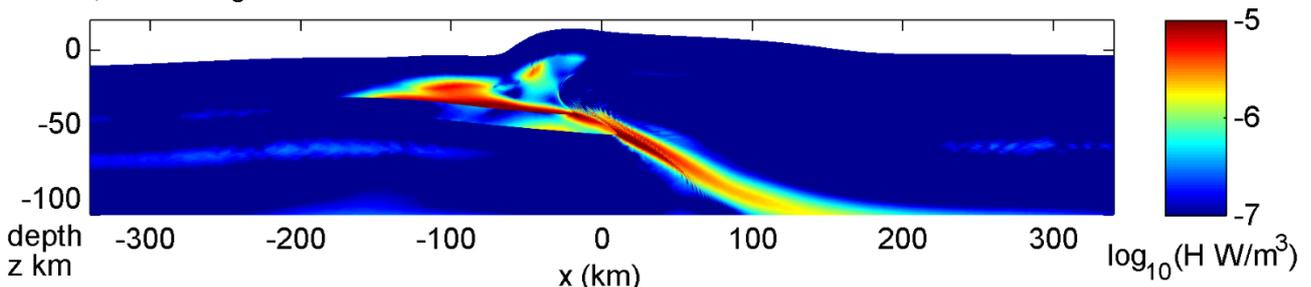
Skalierte Modelle versuchen die grundlegenden Mechanismen und Prozesse, durch welche die geologischen Strukturen geformt werden, zu klären. Diese Experimente verwenden geeignete Materialien und Substanzen, in denen die räumlichen und zeitlichen Massstäbe des natürlichen Phänomens reduziert werden. Solche Analogexperimente sind visuell zufriedenstellend und einige ihrer Resultate entsprechen natürlichen Strukturen.



### Numerische Modelle

Numerische Modelle sind wichtig, um Hypothesen, die aus natürlichen Studien stammen, nachzuweisen. Diese Modelle stellen die Eigenschaften oder die Festigkeit des Materials in numerischen Werten dar, um die Strukturen unter Berücksichtigung dieser Werte zu simulieren. Somit erstellen numerische Modelle ein gültiges Abbild von der natürlichen Erscheinung. Diese Experimente sind auf Hochgeschwindigkeitscomputer angewiesen, um die vielen bestimmenden Faktoren oder Parameter, die in der Natur komplexe Systeme entstehen lassen, in das Modell zu integrieren.

COLD, shortening: 16 %



Nach Burg & Schmalholz 2008 *Earth and Planetary Science Letters* 274, 189-203

## Mathematische Hilfsmittel

Wie in allen Wissenschaften sind mathematische Hilfsmittel notwendig um Eigenschaften und Prozesse der Deformation zu beschreiben und numerisch zu modellieren.

Empfohlene Literatur: L. Papula: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler (Viewegs Fachbücher der Technik)

In der Strukturgeologie sind die folgenden Methoden von besonderer Bedeutung.

### Trigonometrie

Eine allgemeine Annäherung von komplexen Formen bestehe darin, diese als Polygone (Formen mit geraden Ecken) zu vereinfachen. Da jedes Polygon durch die Addition von Dreiecken konstruiert werden kann, ist die Flächentrigonometrie (die Studie von Dreiecken) ein wichtiges Werkzeug für Strukturgeologen. Das **Dreiecksverfahren** (*triangulation*, die Auflösung in Dreiecke) ist Routine in der Geodäsie und in mechanischen Studien, die die **Finite-Element-Methode** benutzen. Der Vorteil dieser Anwendungen resultiert aus der einfachen Regel, dass die Länge der Dreiecksseiten mit der Größe der Winkel in einer Beziehung zueinander stehen.

Wenn  $a$ ,  $b$  und  $c$  die Seitenlängen sind und die jeweils gegenüberliegenden Winkeln  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ , ergeben sich drei Grundregeln:

**Die 180° Regel: Alle drei Winkel zusammen ergeben 180°:**

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

Die Sinusregel: Für ein gegebenes Dreieck ist die Länge jeder möglicher Seite geteilt durch den Sinus des gegenüberliegenden Winkels eine Konstante:

$$a/\sin \alpha = b/\sin \beta = c/\sin \gamma$$

Die Kosinusregel: Diese Regel umfasst drei alternative Gleichungen, die das Pythagoras Theorem generalisieren, um nicht rechtwinklige Dreiecke zu erfassen:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos \beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \gamma$$

Diese Regeln werden vorwiegend verwendet um die tektonisch verursachten Veränderungen in den Winkeln und Abständen zwischen Knotenpunkten, den Ecken des Dreieckes, zu bestimmen.

### Vektor Operationen

Weil sich Punkte während der Deformation bewegen, sind Vektoren bestens dazu geeignet, die Größe und die Richtungen dieser Bewegungen innerhalb eines Koordinatensystems zu beschreiben. Aus der Länge der Vektoren kann man die Größen anderer wichtiger Parameter wie Bewegungsrate oder Kraftintensität usw. beschreiben. Die Aufspaltung in Vektorkomponenten, Vektoraddition, skalare Multiplikation und das Skalarprodukt sind die Operationen, die verwendet werden, um Deformation in jedem möglichen Massstab zu analysieren.

In dieser Hinsicht werden durch **Matrizen** (*matrices*) die Schreibweise und die Handhabung von Gleichungen vereinfacht. Diese Darstellung ist in der Strukturgeologie sehr wichtig, da man oft einige allgemeine lineare Gleichungen gleichzeitig lösen muss.

Diese Operationen werden bevorzugt in der Kontinuumsmechanik verwendet, einer numerischen Methode, die es durch Annäherungen erlaubt, mit Ausnahme von Verwerfungen (Diskontinuitäten), die meisten Gesteinsstrukturen zu modellieren. .

## Differential- und Integralrechnung

Die Erdwissenschaften sind eine prozessorientierte Disziplin und diese Prozesse finden mit einer bestimmten Kinetik statt. In der Strukturgeologie befassen wir uns damit, die Grösse der Formänderung in einer bestimmten Zeit zu untersuchen, was nicht notwendigerweise linear verläuft. Um Schwierigkeiten zu vermeiden, die durch Unregelmässigkeiten entstehen, werden Änderungen in den Geschwindigkeiten als momentane Geschwindigkeit oder Kinetik über einer infinitesimal kleinen Zeitspanne ausgedrückt, die mit der Differenzialrechnung berechnet werden kann. Zum Beispiel ist die Geschwindigkeit  $v$  eines Körpers, der sich entlang einer Linie zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  bewegt, die Ableitung seiner Positionskoordinaten  $x = f(t)$  nach der Zeit  $t$ :

$$v = \frac{\partial x}{\partial t}$$

Die Beschreibung von Deformation als Prozess bezieht **Ableitungen** (*derivatives*) mit ein, deren Standardform in jedem möglichen Lehrbuch der angewandten Mathematik gefunden werden kann. Eine Ableitung ist die Steigung einer Kurve.

**Integration** ist notwendig, um Prozesse zumindest zwischen einigen Grenzen zu verstehen. z.B. wenn man die Versetzung zwischen der Zeit  $t_0$  und  $t_1$  des beweglichen Körpers mit Positionskoordinaten  $x = f(t)$  definieren muss. Das Integral ist die Fläche unter einer Kurve. Dazu müssen die Standardintegrale in der Mathematikliteratur gefunden werden.

In der Praxis findet man die Ausdrücke für natürliche Prozesse, die man integrieren (entwickeln ein Integral) oder differenzieren (erhalten eine Ableitung aus einem Integral) muss, nicht in der Mathematikliteratur. Integration ist das Gegenteil zur Differenzialrechnung: Sie sind inverse Rechnungen. Regeln für Addition, Multiplikation und Substitution müssen erarbeitet werden. Dieses ist ein Thema für Fortgeschrittene in den Geowissenschaften, das weit über den Bereich dieser Einleitung hinausgeht.

## **Zusammenfassung**

Die Erdoberfläche bewegt sich beständig. Die Änderung der Position von Punkten in einem Körper durch **Verschiebung** (*displacement*) von Material resultiert in einer Deformation. Es ist erstaunlich, dass, egal wie kompliziert die Bewegungen der Platten auch immer sind, sie nur eine kleine Anzahl von Deformationsstrukturen (Verwerfungen, Falten und in Verbindung stehende Sekundärstrukturen, Boudins) produzieren können. Die Herausforderung in der Strukturgeologie liegt darin, mit wenigen grundlegenden Formen zwischen kompressiven, extensiven, Blattverschiebungs- und Schwerkraft-kontrollierten tektonischen Systemen zu unterscheiden, aus deren Abfolge die Geschichte unseres Planeten seit seinem Ursprung besteht.

Verwerfungen und Falten, sowie jede Deformationsstruktur, können im kleinsten Massstab oder in Dimensionen von mehreren Kilometern gebildet werden. Einige Strukturen liegen so dicht beieinander, dass es erscheint, als wären sie überall im Gestein. Diese Strukturen werden als **penetrativ** bezeichnet. Die Darstellung dieser dreidimensionalen Formen auf Karten kann in geologischen Profilen zweidimensional betrachtet werden. Für die Umwandlung einer dreidimensionalen Struktur in eine zweidimensionale Profilebene brauchen wir mehr als die Hälfte der Zeit des Grundkurses. Das Ziel dieser Vorlesung wird es sein, die notwendige Beschreibung natürlicher geologischer Strukturen in verschiedenen Massstäben einzuführen und das Basiswissen der bei tektonischen Vorgängen involvierten Mechanismen zu vermitteln.

Dieser Grundkurs betrachtet, wie und warum Gesteine deformiert werden.

Der erste Teil analysiert, wie Deformation Strukturen wie Verwerfungen und Falten erzeugt. Die Prozesse, welche zu finiten, geologischen Strukturen führen, werden durch experimentelle Gesteinsdeformationen, Analogexperimente und durch numerische Modellierungen analysiert. Das Verständnis der Deformationsprozesse erklärt, warum Deformationsstrukturen eine essenzielle geologische Aufzeichnung der alten tektonischen Ereignisse sind. Durch mikroskopische Beobachtung können die physikalischen Grundregeln und die materiellen Parameter, die auf

Gesteinsdeformation zutreffen, erkannt werden. Meso- und makroskopische Beobachtungen helfen, die Stärke der gesamten Lithosphäre und ihr Verhalten von einem kontinuumsmechanischen Gesichtspunkt aus einzuschätzen.

Den zweiten Teil des Grundkurses verwenden wir dazu, Beziehungen zwischen der Plattentektonik und Grossstrukturen, wie Gebirge und **Becken** (*basins*), abzuleiten. Verschiedene Gebirgs- und Beckentypen können auf unterschiedliche plattentektonische Bewegungen zurückgeführt werden. Gebirge und Becken beziehen sich auf aufwärts und abwärts gerichtete Bewegungen der Erdoberfläche, sogenannte **Hebung** (*uplift*) und **Senkung** (*subsidence*). In der Entwicklung von geomorphologischen Formen regen diese vertikalen Bewegungen Erosions- und Sedimentationsprozesse an.

Ein anderer Teil dieses Kurses legt den Schwerpunkt auf mehr lokale morphologische Anpassungen als Folge aktiver Deformation und der daraus resultierenden vertikalen Änderung der Oberflächen.

## Empfohlene Literatur

*Allgemeine Geologie* (1995) F. Press & R. Siever (Amerikanische Originalausgabe: *Understanding Earth*, 1994 ; Freeman & Company ; übersetzt und herausgegeben von V. Schweizer). Spektrum Lehrbuch (Spektrum Akademischer Verlag), 602 S.

*Grundlagen der Tektonik: Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur* (2012) Reuther C.-D. Springer Spektrum, Berlin, 274 S.

*Plattentektonik: Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung* (2007) Frisch W. & Meschede M. Primus, Darmstadt, 196 S.

*Ozeane und Kontinente* (1987) Spektrum-der-Wissenschaft- Verlagsgesellschaft. 5. Aufl.

*Die Dynamik der Erde* (1988) Spektrum-der-Wissenschaft- Verlagsgesellschaft. 2. Aufl.

*Die unruhige Erde* (2001) Spektrum-der-Wissenschaft- Verlagsgesellschaft. Dossier 2/2001.

*Klima* (2002) Spektrum-der-Wissenschaft- Verlagsgesellschaft. Dossier 1/2002.

En français :

*Comprendre et enseigner la planète Terre* (1992) Caron J.-M., Gauthier A., Schaaf A., Ulysse J. & Wozniak J., Editions Ophrys, Paris, 271p.

*Géosciences* (2013) Robert C. & Bousquet R., Berlin, Paris, 1159 p.

<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/tectonique.pl.html>