

Endogene Prozesse

(Zusammenfassung von Christian Betzing , 2011)

Aufgaben der Geowissenschaften: Rohstoff-, Wasser-Versorgung, Entsorgung von Abfällen, Baugrund, Boden, Georisiken, Wissenschaft

Deutschland: Importland, keinen Erzbergbau, hoher Kalisalzabbau, Steinkohleexport wird geringer / Import größer. Braunkohle: weltweit größte Reserven & Förderung. Erdgas/Öl haben (stand 2004) noch eine statische Lebensdauer von 13/14 Jahren (in Deutschland!)

Peak-Oil wurde schon überschritten / in optimistischen-Schätzungen erst 2015-2035
→ Preise steigen an, unabsehbare Folgen für die Wirtschaft, Verknappung geologisch bedingt → sparer leben / alternative Energien.

Universum:

- 12-15 Ga – Urknall
- 4,56 Ga Bildung des Sonnensystem aus solarem Nebel
- vor ca. 4,5 Ga Entstehung der Erde
- 4,45 Ga Bildung der Planeten weitgehend abgeschlossen
- 4,4 Ga Entstehung des Mondes nach Kollision
- 3,8 Ga Ende des Bombardements durch kleinere Himmelskörper

Unterschied: innere Planeten (terrestrische) und äußeren (Gas-Planeten):

- Dichte: 4000-5500 kg/m³ ↔ 700 (Saturn), 1300-1600 kg/m³
- Gas-Planeten bestehen größtenteils aus H und He.
- Gas-Planeten sind bedeutend größer, Durchmesser von 50000km bis 140000km (Pluto nur 2300 km)

Die Erde:

- Abstand zur Sonne: 149.600.000 km
- Durchmesser: 12.700 km
- Masse: $5,9 * 10^{24}$ kg
- Dichte: 5520 kg/m³

Älteste Gesteine sind ca. 4 Ga alt. Einfaches Leben seit mehr als 3 Ga. Höheres vor ca. 600 Ma. Menschen vor 3 Ma und moderne Menschen vor 0,2 Ma.

Meteoritenkrater:

- Viele Meteoritenkrater sind auf der Erde nicht mehr erhalten, da aufgrund von tektonischer Aktivität die Erdkruste immer wieder erneuert und umgestaltet wird.
- Beim Einschlag werden Gesteine verdichtet, erhitzt und auch teilweise geschmolzen.
- Große Meteoriten können zum Massenaussterben führen

Wichtige Meteoritenkrater:

Barringer Crater – Arizona – Durchmesser: 1,2 km – Tiefe: 200m – Entstehung: vor 50 ka

Chicxulub Krater – Mexico – Durchmesser: 200 km – Tiefe: war 30 km – Entstehung: vor 65 Ma
(sorgte für Massenaussterben – Mesozoikum / Känozoikum)

Nördlinger Ries – Deutschland – Durchmesser: 20 km – Entstehung: vor 15 Ma →

(Bruchstück: Steinheimer Becken mit 4 km Durchmesser)

Schalenbau der Erde:

Informationen zum Schalenbau bietet die Seismologie / Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen nimmt mit Tiefe zu, springt an der Mohorovicic- und Gutenberg-Diskontinuität, welche die chemische Zusammensetzung und damit die Dichte und das mechanische Verhalten widerspiegeln.

Von der Oberfläche bis zum Mittelpunkt:

- Kruste (**4-80 km**) – **Moho-Diskontinuität** – Chemie: **O, Si, Al, Fe, Ca, Na, ...**
+ oberster Oberer Mantel
→ Lithosphäre (keine scharfen Grenzen)

- Mantel: **O, Si, Mg, Fe, Al, ...** - (*fest*)
Oberer Mantel:
 - Asthenosphäre (unterlagert Lithosphäre / keine scharfen Grenzen / fließfähig!) **bis 400 km**
 - Mantel-Übergangszone (keine scharfen Grenzen) **bis 700 km**
- Unterer Mantel

- Kern: **Fe, Ni, ...**
 - **2880m** – Äußerer Kern – **Gutenberg-Diskontinuität** - (*flüssig*)
 - 5150 km – Innerer Kern - (*fest*)
 - **bis 6370 km**

Erdkrusten:

- unterscheiden sich in: Mächtigkeit, Chemie, Entstehung, Alter, mechanischem Verhalten
- Mächtigkeit der Lithosphärenplatten wird bestimmt durch: *Temperaturgradient*

Ozeanische Kruste:

- **4-7 km dick**
- basaltische Zusammensetzung
- entsteht kontinuierlich an divergenten Plattengrenzen (zB. MOR), wird an konv. subduziert
- nie älter als 180 Ma
- Alter der ozeanischen Lithosphäre nimmt mit Tiefe zu, Grund: Auskühlung der Lithosphäre

Kontinentale Kruste:

- **30-45 km dick** (auch 20 km bei Krustendehnung, bis 80 km unter Hochgebirgen)
- unterschiedliche Zusammensetzung
- entwickelt sich an konv. Plattengrenzen
- kann nicht subduziert werden → mehrere Ga alt (älteste Gesteine: 4 Ga)
- unterliegt Verwitterung, Abtragung

Isostasie:

- Erdkruste „schwimmt“ auf Erdmantel aufgrund der Dichte
- Erdkruste wird verformt, zusammengestaucht und verdickt → Erdoberfläche hebt sich durch Isostasie heraus und es entstehen Gebirge

Lithosphärenplatten und Plattengrenzen:

7 große Platten: afrikanische, eurasische, pazifische, nord-, südamerikanische, antarktische, indisch-australische Platte + kleinere

Konvektion im Erdmantel / Plattentektonik

- Konvektion erfolgt in cm – dm / Jahr
- Platten bewegen sich mit 1 – 17 cm / Jahr relativ zueinander, durch Konvektion angetrieben
- **Divergente Plattengrenzen:** Platten driften auseinander, es entsteht neue Lithosphäre
- **Konvergente Plattengrenzen:** ältere ozeanische Kruste wird in den Mantel subduziert
- **Konservative Plattengrenzen:** driften aneinander vorbei, nichts geschieht
- An den Grenzen wird die Lithosphäre verformt → Erdbeben → Markierung der Grenzen
- Geschwindigkeit kann durch die **remanente Magnetisierung** bestimmt werden

Erdbeben

- Erdbeben entstehen durch ruckartige Verschiebungen in der Erdkrusten
- Verschiebungen bis zu mehreren Meter / Sekunde
- Vom Erdbebenherd wird Energie in Form von seismischen Wellen abgestrahlt
- **P-Wellen:** Primär- oder Kompressionswellen (Kruste: bis 7,5 km/s ↔ Mantel: 8+ km/s)
- **S-Wellen:** Sekundär- oder Scherwellen (geringere Geschwindigkeit als P-Wellen / Hälfte)
- **Oberflächenwellen** (Oberflächenschäden): **Love- und Rayleigh-Wellen** (v niedriger als P)
- Tsunami: $v = \text{ca. } 600 \text{ km/h}$ (bei 4-5km Tiefe) , nimmt im flachen Gewässer ab, Amplitude steigt! v hängt von Wassertiefe ab
- Schäden an Gebäuden durch entsprechende Bauweise vermeidbar, Vorwarnung bei Tsunamis meistens möglich, wenn ein Tsunami weit im Ozean entsteht

Chemische Zusammensetzung der Erde

- **gesamte Erde:** Fe, O, Si, Mg, Ni, S, Ca, Na, ...
- **Erdkruste:** O, Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, Ti, Mn, ...
- **Erdkern:** Fe, Ni

Xenolithe (Gesteinsbrocken, die bei Vulkanausbrüchen im aufsteigendem Magma nach oben gerissen wurden) geben Informationen über die Zusammensetzung des Erdmantels und -kerns.
ppm = parts per million (Verwendung bei Spurenelementen?)

Minerale und Gesteine

Die häufigsten Minerale der kontinentalen Kruste: **Olivin** (Insel), **Pyroxen** (Ketten), **Amphibol** (Band), **Glimmer** (Schicht), **Feldspat** (Gerüst)

Häufigstes Mineral im *oberen Mantel*: Olivin , *Kruste*: Feldspat

Druck und Temperatur

- 1m Tiefe = Spannung von 26460 Pa = 0,02646 Mpa → 10m = 0,2646 Mpa
- $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/ms}^2$
- Spannung wirkt in größeren Tiefen in alle Richtungen = **Druck** (= **Mittlere Dichte * g * z**)
- Dichte der Gesteine in der *Erdkruste*: **Ca. 2600 – 3000 kg/m³** (2,6 – 3,0 Mg/m³)
- Dichte der Gesteine im *O.Mantel*: **Ca. 2900 – 3400 kg/m³** (2,9 – 3,4 Mg/m³)
- Druck als lineare Funktion der Tiefe
- Temperaturen im Erdinneren sind nicht messbar, nur Prognosen
- **Geothermie** wird bestimmt durch: *Wärmefluss aus dem Erdmantel + Wärme durch*

radioaktiven Zerfall (radioaktive Isotope von Uran, Kalium und Thorium)

Magma, Schmelzen

Durch hohe drücke und überdurchschnittlichen Temperaturen bilden sich im Erdmantel Silikatschmelzen.

Dichte der Schmelzen sind ca. **10% geringer** als vom Gestein und viel niedrigere Viskosität
→ Schmelzen steigen auf

Bildung der Schmelze durch:

- **Temperaturerhöhung** (SolidusT im O.Erdmantel bei 1200°C → basaltische Schmelzen , kontinentale Unterkruste bei Anwesenheit von Wasser (25km Tiefe) bei 650°C granitische)
- **Druckentlastung** (Schmelztemperatur sinkt bei abnehmenden Druck)
- **Zufuhr von Wasser** (SolidusT wird bei Zufuhr erniedrigt, kann so zu Aufschmelzung bei unverändertem P-T-Bedingungen führen)

Zusammensetzung und Verhalten der Schmelzen:

- abhängig vom Ausgangsmaterial, Grad der Aufschmelzung und Tiefe
- in der Regeln wird nur ein kleiner Teil aufgeschmolzen → *partielle Aufschmelzung*
- Aufschmelzung beginnt entlang der Grenzflächen der Mineralkörner
- um aufzusteigen müssen sich die Teilschmelzen erst sammeln → *Schmelzextraktion*
- Aufstieg erfolgt dann durch *Gänge* oder *Diapire*

Eigenschaften:

- Magma besteht aus Schmelze (+ Kristalle + Gasblasen)
- Schmelze ist nicht Magma! Schmelze bestimmt in hohem Maße die Eigenschaft von Magma
- Unterhalb des *Solidus* → fest / Oberhalb des *Liquidus* → nur Schmelze / dazwischen *Schmelzintervall*
- **Viskosität** hängt vom *SiO₂-Gehalt*, von der *Temperatur* und vom gelösten *Wasser* ab (Silikatschmelzen!) / Magmen: Gehalt an Kristallen und/oder Gasblasen
- bei sinkendem Druck (Aufstieg des Magmas) nimmt die Löslichkeit von fluiden Phasen ab und es kann durch Übersättigung zur Bildung von Gasblasen kommen!

Differentiation:

In Magmenkammern können ausgeschiedene Kristalle aufgrund einer niedrigen Viskosität der Schmelze und der eigenen höheren Dichte absinken („absaigern“) und abgelagert werden
→ magmatische Sedimente = **Kumulate**

Durch diesen Entzug entwickelt sich die *Zusammensetzung* der Schmelze in entgegengesetzter Richtung → *Differentiation*

Erstarrte Restschmelzen mit seltenen Mineralen → **Pegmatite**

Hydrothermale Gänge:

Die fluide Phase migriert nach Auskristallisation der Schmelze auf Klüften und Spalten im erstarrten Pluton und Nebengestein, reagiert und setzt nach Abkühlung ihren Lösungsinhalt in den Spalten und Klüften ab.

Vulkanismus:

Eruptionen:

- **hawaiianisch:** Lavafontänen, Lavaeseen, ruhiges Ausfließen, niedrigviskose Lava
- **isländisch:** hohe Förderraten (→ früher Flutbasalte), lange Förderspalten
- **strombolianisch:** leicht explosiv durch Gasblasen, niedrige Förderrate, Lavafetzen
- **plinianisch:** explosiv, Tephra, Eruptionssäulen, pyroklastische Ströme, surges, Glutlawinen, fallout (Untergruppen: *vulcanisch*: sehr starke Explosionen / *peleanisch*: Glutwolken)

Wichtige Flutbasalte:

Name	Wann	Menge	Wo	Zusatz
Columbia River Plateau	15Ma	>200 000 km ³	NW - USA	Bedeckt 200 000 km ²
Deccan	66 Ma	2,6 Mio km ³	Indien	
Sibirien	248 Ma	2,5 Mio km ³		
Parana	134-129 Ma	1,5 Mio km ³	Brasilien	

Die Förderspalten können über 150 km lang sein.

Eruptionsrate damals: $1\text{km}^3/\text{km u. Tag}$ | Heute: Weltweit $4\text{km}^3/\text{Jahr}$, davon $\frac{3}{4}$ submarin

Lava:

- **Pahoehoe** (glatte Oberfläche, Seil- Stricklava)
- **Aa** (raue Oberfläche)
- **Blocklava** (glatte Bruchflächen)
- **Kissen-Lava** (*submarin*, Glasrand)

Transport von Tephra:

- **Fall** (kleine Partikel, Asche fällt aus Eruptionssäule → Wind / Bomben, Blöcke)
- **Surge** (Suspension von Gas u. Partikeln, geringe Partikel-Konzentration, hohe Geschwindigkeit)
- **Flow** / pyroklastischer Strom (>100km/h, folgen Topografie, große Blöcke werden mitgerissen, Ablagerungen → *Ignimbrite*)

Vulkanbauten (aufgebaut aus Lava, Tephra, Intrusionen & Gängen):

- **Schildvulkan:** flach, niedrigviskos aufgebaut, meistens hawaiianische Tätigkeit, Aktivität: 100.000 – 100.000.000 Jahre
- **Stratovulkan:** fördert Lava & Tephra, plinianische Eruptionen
- **Vulkankomplexe:** hochviskos aufgebaut, Dome / pyroklastische Ströme
- **Caldera:** Einbruchskrater über entleerter Magmenkammer, SiO₂-reich → Durchmesser von 30 – 50 km. Bsp: Yellowstone
- **Lavaströme**
- **Dome:** Pfropfen aus hochviskoser Lava
- **Schlackenkegel:** Kegel mit steiler Böschung, aufgebaut aus Lavafetzen (zB. In der Eifel)
- **Tuffringe:** Flache, ringförmige Strukturen, entsteht bei kleineren Explosionen → Magma in Kontakt mit Grundwasser
- **Maare:** Sprengrichter, phreatomagmatischen Eruptionen → Dampfexplosion → plinianische Eruption (Bsp: Laacher See)
- **Vulkanruinen:** Nach Erosion bleiben noch Förderschloten & Gänge als „Hartlinge“ stehen

Gefahren durch Vulkanismus:

Lavaströme, Auswurfpartikel, Fall, pyroklastische Ströme, surges, Lahare, Gasaustritt, Erdbeben, Druckwellen, Tsunamis

Magmenkammern, Plutone, Gänge

Platznahme von aufsteigender Magma:

- *plastische Verformung* des Nebengesteins
- *stoping* (spröde Verformung mit Ablösen von Brocken vom Magmenkammerdach)
- *Aufwölbung* von oberflächennahen Stockwerken
- *Assimilation* (Einschmelzen des Nebengesteins → untergeordnete Rolle)

Plutone sind auskristallisierte Magmenkammern (Bsp: *Bushveld-Pluton* – >66.000km² – 8km Tiefe / *Sierra Nevada Batolith* – >50.000km² / *Patagonischer Batolith*)

Batolithe sind Zusammensetzungen aus mehreren Plutonen bzw. Magmenkammern

Lakkolith: langgestreckte, dünne Magmenkammer → im Zusammenhang von *Aufwölbung*

Spalten (Förderkanäle) durch aufsteigendes Magma aufgerissen

Magma erstarrt → **Gang** (vertikal: **dike**, horizontal: **sill**)

chilled margins: feinkörnig abgeschreckte Ränder des Ganges

Zeit für Abkühlung eines Magmenkörpers hängt ab von:

- Volumen
- Form
- Temperaturunterschied zum Nebengestein

Fluide Phasen

Wärme in der Oberfläche / Erdkruste führt zu:

- Erwärmung & Konvektion des Grundwassers, Lösung & Ausfällung
→ *Stofftransport!*

Evidenz von Hydrothermalsystemen:

- **heiße Quellen** (→ Sinteralablagerungen)
- **Fumarolen** (H₂O-Dampf)
- **Solfataren** (schwefelhaltige Dämpfe)
- **Moffeten** (CO₂-Austritte)
- **Geysire** (Systeme mit episodischem Siedeverzug)

Eigenschaften:

- befinden sich in Klüften, Rissen, Poren entlang der Grenzflächen von Mineralkörnern
- niedrige Dichte (< 1000 kg/m³ bzw. < 1 g/cm³) & extrem niedrige Viskosität (< 10⁻³ Pas)
- wichtigste Komponenten: **H₂O**, **CO₂**, **CH₄**, **N₂**
- **Löslichkeit** nimmt mit zunehmender *Temperatur* und zunehmendem *Druck* zu
- teilweise nur eine Mineralart ↔ magmatische Gänge mehrere Arten
- bilden sich gerne im Umfeld von Magmenkammern
- Material in den Gängen stammt von Nebengesteinen der Intrusion

Metamorphose

Diagenese: Sedimente (bis zu 200°C)

Alteration: Veränderungen unter 200° C bei metam. und magm. Gesteinen

Fazies: beschreibt einen bestimmten P-T-Bereich für Steine
(**Geothermobarometrie**)

Mineralreaktionen:

- **Fest-Fest-Reaktion** (keine fluide Phase): zB. Albit → Jadeit + Quarz
- **Dehydrations-Reaktionen:** zB. Muskowit + Quarz → FS + Sillimanit + Wasser
- **Dekarbonatisierungs-Reaktion:** zB. Calcit + Quarz → Wollastonit + Kohlendioxid

Kontaktmetamorphose:

- lokal begrenzt durch kurzzeitige Aufheizung des Nebengesteins im Kontakt mit Magma
- Druck ändert sich *nicht*
- Temperaturen steigen kurz stark an

Regionalmetamorphose:

- Folge der Änderung der Position des Gesteins bei tektonischen Prozessen
→ langsame, großmaßstäbliche Verformung
- Druck und Temperatur ändern sich dabei *langsam* und *gleichförmig*

Exhumierung der Gesteine:

Zugänglichkeit nach Abtragung und Hebung und/oder Deformation der Kruste

→ bei sinkenden Temperaturen kann es zu Reaktion zwischen den Mineralen kommen, zum Teil unter Aufnahme von Wasser

→ **retrograde** Metamorphose ↔ **prograde** Metamorphose (bei Aufheizung)

Retrograde Metamorphose findet oft nur lokal statt, andere Bereiche verlieren Prägnanz aber nicht

→ Rekonstruktion eines **P-T-Pfades**

Deformation der Gesteine

Spannung = Kraft / Fläche (Einheit: 1 Pa = 1 N/m² = 1 kg/ms²)

(*Normalspannung:* Kraftvektor senkrecht zur Fläche ↔ *Scherspannung:* Kraftv. parallel zur Fl.)

Spannungstensor: Spannung auf die Gesamtheit aller Ebenen durch einen Punkt

(Spannungszustand an diesem Punkt)

Spannungen bewirken Verformung, Verformung misst man als **strain** (= Änderung an einer Konfiguration von Punkten, zb. Längenänderung, gemessen als Elongation)

- dimensionslos, da nur ein Endzustand mit dem Ausgangszustand verglichen wird
- *Verformungsgeschwindigkeit* = **strain-Rate** (Einheit dimensionslos = 1/s = s⁻¹)
- proportional zur Spannung

strain-Rate der *Lithosphäre* liegt ca. bei **10⁻¹⁵** bis **10⁻¹³ s⁻¹**, bei Scherzonen an Plattengrenzen auch noch ein oder zwei Größenordnungen höher. Wesentlich höher in Einflussbereichen Erdbeben.
Für eine strain-Rate von 10⁻¹⁴ s⁻¹ dauert eine Längenänderung um 30% (Elongation = 0,3) 1 Ma.

Verhalten von Gesteinen unter Spannungen:

- zuerst immer elastische Verformung → reversibel → strain verschwindet
- lässt sich mit dem *Hooke'schen Gesetz* beschreiben (Spannung = strain * Elastizitätsmodul)
- werden Spannungen zu groß → irreversible Verformung
- *niedrig P-T* / Obere Erdkruste: Bruch bzw. **spröde Verformung**
- *hoch P-T* / untere Erdkruste / Grenze ca. 300°C : plastisch bzw. **duktile Verformung** (kann durch spröde später überlagert sein)

Aus den entwickelten *Strukturen und Gefügen* kann man die **tektonische Entwicklung** des betreffenden Teils der Erdkruste rekonstruieren, durch:

- Geometrie der Verformung
- seinerzeit wirksame Spannungsfeld
- Magnitude der Spannungen – Temperatur und Druck
- den Druck einer fluiden Phase in Poren und Rissen

Strukturentwicklung bei spröder Deformation

(*Strukturgeologie*)

Abkühlung + Druckentlastung →

Kluft (joint): Riss, Bewegung der Blöcke *senkrecht* zur Bruchfläche

Störung (fault): Riss, Bewegung der Blöcke *parallel* zur Bruchfläche

- **Abschiebung** (horizontale *Dehnung* der Kruste; crustal extension)
- **Überschiebung** (horizontale *Verkürzung* der Kruste; crustal contraction)
- **Blattverschiebung** (strike slip fault)

Krustendehnung:

- **Horst** und **Graben** werden von in entgegengesetzter Richtung einfallenden Abschiebungen begrenzt. Horst \wedge Graben \vee
- Bei *Kontraktion* → Stapelung von Krustenlamellen (hunderte Meter bis Kilometer mächtig)
 - Überschobene Krustenlamelle = **tektonische Decke** (nappe)
 - Überschiebungsfläche = **Deckenbahn** (thrust plane)
- Hebung, Abtragung, Erosion → „Loch“ in der Decke = **tektonisches Fenster** (tec. window)
 - isolierte Reste der Decke = **Klippen**

Veränderung der Gesteine durch Störungen:

Gesteine werden an Störungen gebrochen, zum Teil auch wieder durch Lösungen „zementiert“.

Erdoberfläche:

- **Gesteinsmehl** (gouge)
- **Brekzie** (breccia), fragmentiertes Gestein
- **Harnisch** (slickenslide), glänzend polierte Gesteinsoberfläche

Tiefe:

- **Kataklasit** (cataclasite), durch *Zementation* mit aus der Porenlösung ausgefallten Mineralien *verfestigte Brekzien*

Größere Tiefen:

- **Mylonit** (mylonite), foliiertes metamorphes Gestein mit relativ intensiver duktiler Verformung (duktile Scherzone)

Erdbeben + Bewegungen an den Störungen = Reibungswärme → Gestein schmilzt lokal auf und erstarrt rasch zu Gesteinsglas → **Pseudotachylit**

Bewegungssinn und **-betrag** an Störungen lassen sich am *Versatz bestimmter Vorzeichnungen*, zB. Schichten ableiten.

Bewegungssinn auch an den *Stufen in Harnischen* ablesbar (Betrag nicht!)

Strukturentwicklung bei duktiler Deformation

duktiler Scherzone: lokalisierte inhomogene duktile Verformung

Foliation: durch starke Deformation aus Inhomogenitäten entstandener Lagenbau im Gestein

Schieferung: durch Einregelung anisometrischer Mineralkörner bedingte bevorzugte Teilbarkeit

Streckungsfaser: *erkennbare Richtung maximaler Streckung durch Einregelung anisom. Körner und auseinandergedriftete Fragmente von der Deformation zerbrochenen Mineralkörner*

Falten:

– entstehen bei duktiler Verformung eines lagig aufgebauten Gesteinskörpers, wenn die Verkürzung etwas parallel zum Lagenbau erfolgt (gedrückt)

– *Form* hängt ab von: - Art des Lagenbaus
- Kontrast in der Viskosität zwischen den Lagen
- Dicke der Lagen
- Ausmaß der Verkürzung

– aus der Form kann man also auf diese Eigenschaften zurückschließen!

Boudins: entstehen ..., wenn die Verkürzung etwa senkrecht zum Lagenbau erfolgt (gestreckt)

gefaltete Lage bei Sedimenten = sedimentärer Lagenbau bzw. Schichtung (SS)

Schenkel (Lang- Kurzschenkel bei asymmetrischen Falten)

Scharnier

Faltenachse: Linie entlang der höchsten Krümmung

Gesamtheit aller Faltenachsen in benachbarten Lagen= **Achsenfläche**

Eine Achsenflächen-Schieferung entwickelt sich in den niedrigviskosen Lagen bei starker Verkürzung, also in engen Falten

Flexur (monocline), **Sattel**, **Mulde**, **Großfaltenbau**

Geschwindigkeit geologischer Prozesse, Zeitmarken, Altersbestimmung

– **Relativ-Bewegung der Lithosphärenplatten:** $< 1 \text{ cm/Jahr} - 17 \text{ cm/Jahr}$
ermittelt anhand der globalen Altersstruktur der ozean. Lithosphäre → remanente Magn.
Oder mit Hilfe geodätischer Verfahren

– **Bewegung der Lithosphärenplatten relativ zu Hot Spots:** *ca. 9 cm/Jahr* (Bsp. Hawaii)
bestimmt durch die Distanz zwischen Vulkanen der vom hot spot hinterlassenen Vulkankette und deren Alter. (**Hot Spots:** punktuell aufsteigende heiße Materialströme im Erdmantel, die im obersten Mantel zur Schmelzbildung führen. Bewegen sich selbst in einigen mm/Jahr)

– **Vertikalbewegung der Kruste:** $1/10 \text{ mm/Jahr}$
im Extremfall: cm/Jahr (Oberflächen von aktiven Vulkanen auch bis zu mehreren Meter/Tag)

- **Verschiebung bei Erdbeben:** *einige m/s*
- **P-Wellen:** *bis 7 km/s* in der Kruste, *über 8 km/s* im Mantel
- **S- und Oberflächenwellen:** niedriger als P-Wellen, aber gleiche Größenordnung
- **Duktile Verformung von Gesteinen der tieferen Kruste:** strain-Rate: 10^{-12} bis $10^{-16} s^{-1}$
strain-Rate von $10^{-14} s^{-1}$ = Längenänderung um 30% in 1 Ma
Biostratigraphie → *Leitfossilien*

Anforderungen für Leitfossilien:

- eng begrenzte vertikale Verbreitung in der Stratigraphie (kurze Lebensdauer der Art)
- große horizontale Verbreitung (Idealfall: weltweit)
- häufiges Vorkommen
- gute Erhaltung
- eindeutige Merkmale

Metamorphe Gesteine enthalten in der Regel keine Leitfossilien, *magmatische* nie!
Für deren Datierung kommt nur die Isotopen-Methode in Frage.

→ **Isotopen-Methode:** radioaktiver Zerfall instabiler Isotope mit geeigneten Halbwertszeiten

Aus dem Konzentrationsverhältnis zwischen Mutter- und Tochter-Isotop (letzteres durch den Zerfall entstanden) berechnet man (für die bekannte Zerfallskonstante) die Zeit seit der Schließung des Systems.

Die Konzentration des Tochter-Isotops zur Zeit der Schließung muss bekannt sein (oder ermittelbar sein) und von der gemessenen Konzentration abgezogen werden.

Datierungsmethoden:

- **K-Ar** (vor allem vulkanische Gesteine und den Zeitpunkt der Abkühlung metam. Gesteine)
- **Rb-Sr** (Gesamtgesteinalter magmatischer Gesteine)
- **U-Pb** (U-reiche Mins wie Zirkon, Monzanit und damit Magmatismus/Metam./Abkühlung)
- **Spaltspurenmethode** (Zeitpunkt der Abkühl. des Gesteins unter der charakteristischen T)
- **¹⁴C-Methode** (nur für organische Substanzen geeignet bis zu einem Alter von 40000 Jahren)

Struktur der Kruste und Entschlüsselung ihrer geologischen Geschichte:

- Rekonstruktion der tektonischen und magmatischen Entwicklung eines Teils der Erdkruste beruht auf **Diskordanzen** und deren **Kriterien der Überlagerung, Überprägung und Durchschneidung**